



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

ARTO HAARANEN
KELLUVAN KIPSIVALULATTIAN KUIVUMINEN

Diplomityö

Tarkastaja: professori Juha Vinha
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
24. helmikuuta 2017

TIIVISTELMÄ

HAARANEN ARTO: Kelluvan kipsivalulattian kuivuminen

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 174 sivua, 88 liitesivua

Helmikuu 2017

Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Rakennesuunnittelu

Tarkastaja: professori Juha Vinha

Avainsanat: kipsivalu, kipsi, kuivuminen, lattialämmitys

Kosteiden rakenteiden on annettava kuivua tai niitä on kuivatettava riittävästi ennen kuin ne peitetään kuivumista hidastavalla ainekerroksella tai pinnoitteella. Liian kosteana pinnoitetuissa rakenteissa saattaa ilmetä rakenteellisia tai esteettisiä vaurioita ja näiden kosteusvaurioiden seurauksena voi aiheutua sisäilmaongelmia. Tämän tutkimuksen tärkeimpänä tavoitteena oli selvittää Knauf LM80 lattiamassalla valetun kelluvan pintalaatan kuivumisnopeus riittävän kuivumisen määrittelyn tueksi.

Tärkeimpänä tutkimusmenetelmänä käytettiin kokeellista seurantatutkimusta, joka toteutettiin ensisijaisesti laboratorio-olosuhteissa. Laboratoriotutkimuksissa seurattiin paksuudeltaan 50 mm ja 80 mm olevien koerakenteiden kuivumista vakio-olosuhteissa. Koerakenteissa varioitiin valun paksuuden lisäksi lattialämmityksen käyttöä rakenteen kuivatuksen tehostamisessa. Laboratoriokokeiden tulosten luotettavuus ja soveltuvuus käytäntöön varmistettiin kenttätutkimuksilla.

Tärkeimpänä uutena tietona tutkimustuloksista havaittiin, että valun paksuudella on oletettua suurempi vaikutus kipsivalulattian kuivumisnopeuteen. Lämmittämättömissä rakenteissa laatan paksuntaminen 50 millimetristä 80 millimetriin lähes nelinkertaisti kuivumisajan. Lämmitetyissä (25 °C) rakenteissa vastaava paksuuden muutos aiheutti kuivumisajan kolminkertaistumisen ja kuumennetuissa (50 °C) rakenteissa kuivumisaika kaksinkertaistui. Lämmityksen ja kuumennuksen avulla kuivumisaikaa pystyttiin lyhentämään 20...80 % verrattuna saman paksuiseen lämmittämättömään rakenteeseen. Uutena ilmiönä tutkimuksessa havaittiin odottamaton kosteusjakauman muutos koekappaleiden pinnoituksen yhteydessä. Pinnoituksen seurauksena mittausten perusteella kuiviksi todettujen koekappaleiden huokosilman suhteellinen kosteus nousi erittäin nopeasti kymmeniä prosentteja. Ilmiö ei rajoittunut pelkästään koekappaleen pintaan vaan se havaittiin selvästi myös koekappaleen pohjan lähellä.

Kuivumisaikojen lyhentämiseksi on syytä tutkia mahdollisuus ohuempien rakenteiden käyttöön sekä selvittää kuumentamisen vaikutukset koko rakenteen kosteustekniseen käyttäytymiseen. Lämmityksen käytön tehostamiseksi olisi selvítettävä mahdollisuus lämmityksen varhaisempaan aloitukseen sekä kuivatuksen kannalta tehokkaimmat lämpötilat ja lämmitysajat. Jatkotutkimuksena olisi syytä selvittää Knauf LM80 lattiamassan materiaaliominaisuudet, jolloin edellä mainittuja tarkasteluja pystytään tekemään laskennallisesti. Laskennallisten tarkastelujen paikkansapitävyys on varmistettava koerakenteilla, joten tällä tutkimuksella luotiin pohjaa myös tuleville tutkimuksille. Pinnoituksen vaikutus tutkitun rakenteen kosteusjakaumaan oli merkittävä, mutta tässä tutkimuksessa ei saatu selville ilmiön todellista aiheuttajaa. Pinnoituksen vaikutusten tutkiminen nouseekin ensisijaiseksi kiinnostuksen kohteeksi jatkotutkimuksissa.

ABSTRACT

HAARANEN ARTO:

Drying of Calcium Sulphate Floor Screed Cast on Insulation Layer

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 174 pages, 88 Appendix pages

February 2017

Master's Degree Programme in Civil Engineering

Major: Structural Design

Examiner: Professor Juha Vinha

Keywords: gypsum, calcium sulphate, floor screed cast, drying, underfloor heating

Moist structures must be let dry or structures must be dried before they can be covered with impermeable coatings. It may lead to structural or aesthetical impediments if a structure contains too much moisture when coated and this kind of a moisture damage may cause poor indoor climate. The main purpose of this study was to determine the drying pace of Knauf LM80 calcium sulphate floor screed cast on insulation layer. Drying pace is an important feature when a sufficient drying rate is specified.

The primary research method was experimental longitudinal study in laboratory conditions. Laboratory research was implemented in constant indoor climate conditions and it focused on the drying of test structures with the thickness of 50mm and 80mm. In some test structures was equipped with underfloor heating system to intensify drying rate. Also field surveys were arranged to increase reliability of results and to test the practical suitability.

The most important outcome of this research was to notice that the thickness of the calcium sulphate floor screed cast had a much greater effect on the drying rate than was expected. The drying time of non-heated structures was quadrupled when thickness of the cast was raised from 50mm to 80mm. The drying time was tripled in structures that were warmed up to 25°C and in structures that were heated up to 50°C the drying time was doubled. Using underfloor heating to intensify drying rate decreased the drying time 20...80% when compared to non-heated structure with same thickness. A whole new phenomenon came to prominence when the structures were coated with vinyl flooring. As an aftereffect of coating the moisture content in entrapped air in material pores ascended tens of percents although the structure was confirmed to be dry before coating. The phenomena was not limited only on the surface section of the structure but it was also measurably noticed at the underside of the slab.

The possibility of using of thinner structures requires further studies. In addition the consequences of heating to structures moisture performance should be explored. It should as well be examined if it is possible to start heating earlier after the cast to improve the exploiting of underfloor heating for drying. An additional issue that needs to be studied is what are the most effective heating durations and temperatures. The above-mentioned study can be done by computational methods. For computational research the material properties are needed so some effort should be done for those too. The reliability of computational research must always be confirmed with structural tests so the starting point for further research has been laid. The aftereffect of the coating was prominent but the real source of the phenomenon was not discovered hence a further research is needed.

ALKUSANAT

Tämä tutkimus on tehty Tampereen teknillisen yliopiston talouden ja rakentamisen tiedekunnassa (TRT) rakennustekniikan tutkinto-ohjelman diplomityönä. Tutkimus toteutettiin erillisprojektina rakennusfysiikan työryhmässä professori Juha Vinhan johdolla.

Haluan kiittää professori Juha Vinhaa diplomityöni tarkastamisesta sekä tutkimustyöhön liittyvästä ohjauksesta. Erityiskiitokset kuuluvat projektitutkija Eero Tuomiselle, jonka apu työn suoritukseen ja toteutukseen liittyvissä kysymyksissä oli korvaamattoman arvokasta. Työn suoritusvaiheessa saadut oikea-aikaiset ja asiantuntevat neuvot sekä raportointiin liittyvät kommentit ja kyseenalaistukset ovat ensiarvoisen tärkeitä, kiitos.

Suuret kiitokset Knauf Oy:n kehityspäällikkö Max Tollander de Balschille ja tuotepäällikkö Jenna Alakoskelle tutkimuksen tilauksesta sekä hyvin toimineesta yhteistyöstä projektin aikana. Kiitokset Knauf Oy:lle ja TTY-säätiölle tutkimuksen rahoituksesta.

Tärkeimmät ja suurimmat kiitokseni osoitan Paulalle ja lapsillemme Aapolle ja Aadalle. Kiitos kun jaksoitte olla tukena ja annoitte merkityksen tälle ponnistelulle. Nyt ei opiskeltu koulua tai elämää varten vaan perheemme tulevaisuutta ajatellen!

Tampereella, 27.03.2017

Arto Haaranen

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
1.1	Tutkimuksen taustaa.....	1
1.2	Tutkimuksen tavoitteet ja rajaus	2
1.3	Tutkimuksen aikataulu, rakenne ja tutkimusmenetelmät.....	2
2.	KOSTEUS ILMASSA JA HUOKOISESSA MATERIAALISSA.....	4
2.1	Kosteus ilmassa	4
2.2	Materiaalin huokoisuus ja sen määrittäminen	8
2.3	Kosteus huokoisessa materiaalissa.....	11
2.3.1	Vesihöyryn siirtyminen huokoisessa materiaalissa.....	12
2.3.2	Vesihöyryn sitoutuminen huokoiseen materiaaliin.....	14
2.3.3	Nestemäisen veden siirtyminen huokoisessa materiaalissa	18
2.3.4	Huokoisen materiaalin tasapainokosteus ja hystereesi	22
2.4	Huokoisen materiaalin kuivuminen	23
2.4.1	Kuivumisen vaiheet.....	23
2.4.2	Kuivumisen laskennalliset tarkastelut.....	24
2.5	Rakenteiden kuivatus	26
2.5.1	Riittävän kuivumisen arviointi.....	26
2.5.2	Kuivumisen nopeuttaminen	29
3.	KIPSIN JA KIPSIMASSAN OMINAISUUDET	30
3.1	Kipsi	30
3.1.1	Kipsifaasit	31
3.1.2	Kipsin hydrataatio	32
3.1.3	Kipsin materiaaliominaisuudet	33
3.1.4	Kipsin rakennustekninen käyttö.....	41
3.2	Kipsipohjainen Knauf LM80 lattiamassa.....	42
3.2.1	Knauf LM80 Lattiamassan valmistus ja käyttö	42
3.2.2	Knauf LM80 Lattiamassan kuivuminen	43
3.2.3	Knauf LM80 Lattiamassan tuotetiedot ja materiaaliominaisuudet	45
4.	RAKENNUSFYSIKAALISET MITTAUKSET	48
4.1	Lämpötilan mittaaminen.....	48
4.1.1	Lasilämpömittari	49
4.1.2	Vastuslämpömittari	49
4.1.3	Termoelementit	51
4.1.4	Infrapunälämpömittarit	52
4.1.5	Muita lämpötilan mittausten menetelmiä.....	53
4.2	Ilman suhteellisen kosteuden mittaaminen.....	53
4.2.1	Fysikaalisiin ominaisuuksiin perustuva mittaaminen	53
4.2.2	Sähköisiin ominaisuuksiin perustuva mittaaminen	54
4.2.3	Optisiin ominaisuuksiin perustuva mittaaminen	55
4.3	Materiaalin kosteuspitoisuuden mittaaminen	55

4.3.1	Suorat mittausmenetelmät.....	56
4.3.2	Epäsuorat mittausmenetelmät	56
4.4	Materiaalin huokosilman suhteellisen kosteuden mittausmenetelmät	58
5.	TUTKIMUKSESSA KÄYTETYT MITTAUSMENETELMÄT JA MITTALAITTEET	61
5.1	Tutkimuksessa käytetyt mittausmenetelmät	61
5.2	Tutkimuksessa käytetyt mittalaitteet.....	62
5.2.1	Rotronic AG:n laitteet.....	62
5.2.2	Wiiste Oy:n laitteet	69
5.2.3	Vaisala Oyj:n laitteet.....	72
5.2.4	CEM instruments laitteet	77
5.2.5	Tutkimuksessa käytettyjen RH/T mittalaitteiden vertailu	78
5.2.6	Kapasitanssineulaparit	79
6.	KOEJÄRJESTELYT	83
6.1	Laboratoriokokeet	83
6.2	Kenttäkohde 1	89
6.3	Kenttäkohde 2	91
7.	KOKEIDEN SUORITUS	94
7.1	Laboratoriokokeet	94
7.1.1	Mittalaitteiden asennus	97
7.1.2	Valu.....	98
7.1.3	Kuivumisen seuranta vakio-olosuhteissa.....	102
7.1.4	Koekappaleiden pinnoitus.....	106
7.1.5	Kuivumisen jälkiseuranta.....	107
7.2	Kenttäkohde 1	108
7.2.1	Mittalaitteiden asennus	108
7.2.2	Valu.....	110
7.2.3	Kuivumisen seuranta työmaaolosuhteissa	111
7.3	Kenttäkohde 2	113
7.3.1	Mittalaitteiden asennus	115
7.3.2	Valu.....	118
7.3.3	Kuivumisen seuranta työmaaolosuhteissa	119
7.3.4	Mittautulosten varmentaminen rinnakkaismittauksilla	122
8.	TULOKSET	123
8.1	Laboratoriokokeet	124
8.2	Kenttäkohde 1	126
8.3	Kenttäkohde 2	127
8.4	Kapasitanssimittaukset.....	128
9.	TULOSTEN LUOTETTAVUUDEN ARVIOINTI.....	130
9.1	Epätarkkuustekijät mittauslaitteistoissa	132
9.1.1	Rotronic AG:n laitteet.....	132
9.1.2	Wiiste Oy:n laitteet	135
9.1.3	Vaisala Oyj:n laitteet.....	136

9.1.4	CEM instruments laitteet	137
9.2	Epätarkkuustekijät koejärjestelyissä ja tutkimusmenetelmissä.....	138
9.2.1	Laboratoriokokeet	138
9.2.2	Kenttäkohde 1	139
9.2.3	Kenttäkohde 2	140
10.	TULOSTEN TULKINTA JA PÄÄTELMÄT	142
10.1	Valun paksuuden vaikutus kuivumisaikaan	143
10.2	Lattialämmityksen vaikutus kuivumisaikaan	147
10.3	Kuivumisolosuhteiden vaikutus kuivumisnopeuteen.....	152
10.4	Pinnoituksen vaikutus kosteusjakaumaan	155
10.5	Kelluvan Knauf LM80 kipsimassalattian kuivumisaika-arvio	157
11.	MAHDOLLISET JATKOTUTKIMUKSET	159
11.1	Materiaaliominaisuuksien määrittäminen	159
11.2	Kuivumisen laskennallinen tarkastelu.....	161
11.3	Kapasitanssin mittaukseen perustuvan mittalaitteiston kehittäminen.....	163
11.4	Lattialämmityksen käytön tehostaminen rakenteen kuivatuksessa.....	163
11.5	Kuivumisaika-arvion tarkentaminen	164
11.6	Pinnoituksen vaikutusten tutkiminen	164
12.	TUTKIMUKSEN YHTEENVETO	165
	LÄHTEET.....	170
	LIITTEET	175

MERKINNÄT

β_v	pinnan kosteudensiirtokerroin	m/s
δ_v	vesihöyrynläpäisevyys (vesihöyrypitoisuuden suhteen)	m ² /s
δ_p	vesihöyrynläpäisevyys (vesihöyryn osapaine-eron suhteen)	kg/(msPa)
ε_p	huokoisuus	m ³ /m ³ , -
φ	suhteellinen kosteus	% RH
λ	lämmönjohtavuus	W/(mK)
μ	diffusiovastuskerroin	-
ν	vesihöyrypitoisuus (absoluuttinen kosteus)	kg/m ³
ν_{sat}	vesihöyryn kyllästyspitoisuus (kyllästyskosteuspitoisuus)	kg/m ³
θ	Lämpötila	°C
ρ	tiheys	kg/m ³
ρ_a	ilman tiheys $\approx 1,2$	kg/m ³ (20 °C)
ρ_w	veden tiheys ≈ 1000	kg/m ³ (0 °C)
σ_w	veden pintajännitys $\approx 0,073$	N/m (20 °C)
ξ_φ	ominaiskosteuskapasiteetti (hygroskooppisella alueella)	kg/m ³ , kg/kg
ξ_s	ominaiskosteuskapasiteetti (kapillaarisella alueella)	kg/(m ³ Pa), kg/(kgPa)
ψ	kosteuspitoisuus (tilavuusosina)	m ³ /m ³ , tilavuus-%
a	terminen diffusiviteetti	m ² /s
c_p	ominaislämpökapasiteetti vakioapaineessa	J/(kgK)
d	paksuus, halkaisija	mm, m
g	kosteusvirran tiheys	kg/(m ² s)
g	putoamiskiihtyvyyden $\approx 9,81$	m/s ²
h_{cv}	pinnan konvektiivinen lämmönsiirtokerroin	W/(m ² K)
k	ominaisläpäisevyys (permeabiliteetti) (ominaisläpäisevyys kaasuille ja nesteille)	m/s
k_w	kosteudenjohtavuus	kg/(msPa)
l	pituus	m
m	massa	kg
p	paine	Pa, N/m ²
p_v	vesihöyryn osapaine	Pa
$p_{v,sat}$	vesihöyryn kyllästysosapaine	Pa
r	säde	m
s	huokosalipaine, kapillaari-imu	Pa
s_d	suhteellinen diffusiovastus	m
t	aika	s, h, d, a
u	kosteuspitoisuus (paino-osina)	kg/kg, paino-%
w	kosteuspitoisuus	kg/m ³
w_{hydr}	hydratoitumiseen kuluva vesimäärä	kg/m ³

A	pinta-ala	m^2
A_w	veden imeytymiskerroin (kapillariteettikerroin)	$\text{kg}/(\text{m}^2\text{h}^{0.5})$
B_w	veden tunkeutumiskerroin	$\text{m}/\text{s}^{0.5}$
D_w	kosteusdiffusiviteetti	m^2/s
$D_{w,v}$	kosteusdiffusiviteetti vesihöyryn siirtymiselle	m^2/s
$D_{w,s}$	kapillaarinen kosteusdiffusiviteetti	m^2/s
G	kosteusvirta	kg/s
M_a	ilman moolimassa $\approx 28,96$	kg/kmol
M_w	veden moolimassa $\approx 18,02$	kg/kmol
P_n	normaali ilmanpaine ≈ 101325	Pa
R	yleinen kaasuvakio $\approx 8314,5$	$\text{J}/(\text{kmolK})$
T	lämpötila	$\text{K}, ^\circ\text{C}$
V	tilavuus	m^3
Z_v	vesihöyrynvastus (vesihöyrypitoisuuseron suhteen)	s/m
Z_p	vesihöyrynvastus (vesihöyryn osapaine-eron suhteen)	$\text{m}^2\text{sPa}/\text{kg}$

MÄÄRITELMÄT

Absorptio

Atomien, molekyylien ja ionien sitoutuminen/imeytyminen nesteeseen, kaasuun tai kiinteään aineeseen.

Adheesio

Adheesio on kahden eri aineen molekyylien välinen vetovoima. Tässä yhteydessä adheesio synnyttää veden ja huokosputken välisen vetovoiman kapillaari-ilmiössä.

Adsorptio

Atomien, molekyylien ja ionien sitoutuminen aineen pinnoille. Adsorptio voi olla monomolekulaarista (yksi molekyylikerros huokosseinämän pinnalla) tai polymolekulaarista (useamman molekyylin paksuinen kerros huokosseinämän pinnalla).

Alkukosteus

Valmistettuun kipsimassaan sekoitetun veden määrä. Knauf LM80 lattiamassassa alkukosteus on 0,15...0,16 kg(vettä)/kg(kuivalaastia).

Avustettu diffuusio

Avustetussa diffuusiassa materiaalin huokokset ovat niin pieniä verrattuna siirtyvien kaasumolekyylien kokoon, että molekyylien siirtymiseksi tarvitaan konsentraatioeron lisäksi jokin muu gradientti (esim. paine)

Desorptio

Absorption ja adsorption käänteisilmiö, jossa materiaalista tai materiaalin huokosista poistuu molekyyliä, atomeita tai ioneita.

Diffuusio

Tässä tutkimuksessa diffuusiolla tarkoitetaan materiaalin huokosissa tapahtuvaa kaasumolekyylien liikettä, joka pyrkii tasoittamaan kaasuseoksessa olevia yksittäisen kaasun pitoisuuseroja tai osapaine-eroja. Diffuusiassa molekyylit siirtyvät korkeammasta pitoisuudesta alemmaksi pitoisuutta kohden eli diffuusion aiheuttajana on konsentraatiogradientti.

Diffuusiovastuskerroin

Diffuusiovastuskerroin (μ) ilmoittaa paikallaan olevan ilman ja huokoisen aineen vesihöyrynläpäisevyyksien suhteen. Kerroin ilmoittaa myös tietyn paksuisen ainekerroksen ja yhtä paksun ilmakerroksen vesihöyrynvastuksien suhteen. Kertoimen arvoa määritettäessä paikallaan olevan ilman vesihöyrynläpäisevyytenä voidaan käyttää arvoa 195×10^{-12} kg/(msPa).

Effuusio

Effuusiolla eli Knudsenin diffuusiolla materiaalin huokosten koko suhteessa siirtyvien kaasumolekyylien kokoon on sellainen, että molekyylit törmäilevät enemmän huokosen seinämiin kuin toisiinsa.

Huokoisuus

Huokoisuus (ξ tai ψ) kuvaa materiaalin huokostilavuuden suhdetta materiaalin koko tilavuuteen.

Hydratoituminen

Vesimolekyylien kiinnittymistä ioniin dipoli-ionisidoksin. Rakentamisessa usein puhutaan sementin hydratoitumisesta, mutta tässä tutkimuksessa ilmiöllä tarkoitetaan ensisijaisesti kipsin hydratoitumista.

Hygroskooppinen kyllästyskosteuspitoisuus

Hygroskooppinen kyllästyskosteuspitoisuus (w_{hygr}) ilmaisee sen kosteuspitoisuuden, jonka huokoinen materiaali voi saavuttaa sitomalla kosteutta pelkästään ympäröivästä ilmasta.

Hygroskooppinen tasapainokosteuskäyrä eli sorptiokäyrä

Kuvaa materiaalin kosteuspitoisuutta suhteellisen kosteuden funktiona täysin kuivasta materiaalista hygroskooppiseen kyllästyskosteuspitoisuuteen asti. Tasapainokosteuskäyrään piirretään tavallisesti sekä kuivemmasta kosteampaan päin mitattu tasapainokosteuskäyrä (adsorptiokäyrä) että kosteammasta kuivempaan päin mitattu tasapainokosteuskäyrä (desorptiokäyrä).

Hygroskooppisuus

Hygroskooppisuus tarkoittaa huokoisen materiaalin kykyä sitoa itseensä kosteutta ilmasta ja luovuttaa sitä takaisin ilmaan.

Hystereesi

Desorptio- ja adsorptiokuvaajien välistä eroa kutsutaan hystereesiksi. Desorptiokäyrällä olevat kosteuspitoisuuden arvot ovat yleensä suurempia kuin adsorptiokäyrän arvot samassa suhteellisessa kosteudessa. Ilmiön katsotaan aiheutuvan muun muassa nk. mustepullo -efektistä.

Kapasitanssi

Kapasitanssi (C) on kondensaattorin varauksen (Q) ja jännitteen suhde (U), $C = Q / U$ ja se kuvaa kondensaattorin kykyä varastoida sähköenergiaa. Kapasitanssin yksikkö on faradi (F). Kapasitanssin suuruus riippuu kappaleiden muodosta, koosta, etäisyydestä ja välissä olevan eristeen suhteellisesta permittiivisyydestä.

Kapillaarinen tasapainokosteuskäyrä

Kuvaa materiaalin kosteuspitoisuutta keskimääräisen huokosalipaineen (s) tai huokosten säteen (r) funktiona hygroskooppisesta kyllästyskosteuspitoisuudesta maksimikosteuspitoisuuteen asti. Tasapainokosteuskäyrään piirretään tavallisesti sekä kuivemmasta kosteampaan päin mitattu tasapainokosteuskäyrä (adsorptiokäyrä) että kosteammasta kuivempaan päin mitattu tasapainokosteuskäyrä (desorptiokäyrä).

Kapillaarinen kosteusdiffusiviteetti

Kapillaarinen kosteusdiffusiviteetti ($D_{w,s}$) on materiaaliominaisuus, joka kuvaa sitä, kuinka nopeasti materiaalin kosteuspitoisuus muuttuu uuteen tasapainotilanteeseen olosuhteiden muuttuessa kapillaarisella alueella. Kapillaarisen kosteusdiffusiviteetin arvossa otetaan huomioon pintadiffuusion sekä kapillaarisen, painovoimaisen ja paineenalaisen veden siirtymisen vaikutukset.

Kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus

Kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus (w_{cap}) ilmaisee sen kosteuspitoisuuden, jonka huokoinen materiaali voi saavuttaa ollessaan jatkuvasti yhteydessä nestemäiseen veteen normaalissa ilmanpaineessa.

Kapillaarisuus

Kapillaarisuus tarkoittaa materiaalin kykyä siirtää vettä ohuissa materiaalihuokosputkissa vaikuttavien kapillaarivoimien (adheesio ja koheesio) vaikutuksesta huokosputkien täyttyessä vedellä. Kapillaarivoimat synnyttävät huokosputken vesipintaan kapillaari-imupaineen (huokosalipaineen), jonka ansiosta vesi siirtyy huokosputkessa eteenpäin.

Kapillaarivirtaus

Kapillaarivirtaus tarkoittaa huokosalipaine-eron aiheuttamaa nestemäisen veden siirtymistä aineen huokosissa.

Kastepistelämpötila

Kastepistelämpötila (T_{dew}) tarkoittaa lämpötilaa, jossa ilmassa oleva vesihöyry tiivistyy vedeksi eli kondensoituu, kun ilman vesihöyrypitoisuus ylittää vesihöyryn kyllästyspitoisuuden. Kondensoituminen havaitaan ensimmäisenä viilleillä kovilla pinnoilla.

Koheesio

Koheesio on aineen molekyylien sisäinen vetovoima. Tässä yhteydessä koheesio muodostaa vesimolekyylien vetovoimia kapillaari-ilmiössä ja polymolekylaarisessa adheesiassa.

Kondensoituminen

Kondensoituminen tarkoittaa vesihöyryn tiivistymistä rakenteen sisällä tai pinnalla vedeksi, kun ilman vesihöyrypitoisuus on saavuttanut kyseisessä kohdassa vesihöyryn kylästyspitoisuuden tai vesihöyryn osapaine on saavuttanut vesihöyryn kyllästysosapaineen ($\phi = 100 \% RH$).

Kosteus

Kemiallisesti sitoutumatonta vettä kaasumaisessa, nestemäisessä tai kiinteässä olomuodossa

Kosteusdiffusiviteetti

Kosteusdiffusiviteetti (D_w) on materiaaliominaisuus, joka kuvaa kosteuden siirtymistä materiaalissa. Mitä suurempi kosteusdiffusiviteetin arvo on, sitä nopeammin kosteus siirtyy materiaalissa ja materiaalin kosteuspitoisuus saavuttaa uuden tasapainotilan olosuhteiden muuttuessa. Kosteusdiffusiviteetti sisältää kaikki kosteuden siirtymismuodot.

Kosteuspitoisuus

Kosteuspitoisuus (w, u, ψ) ilmoittaa materiaalin sisältämän kosteuden kokonaismäärän eri olomuodoissa joko kuivatilavuuteen tai kuivapainoon suhteutettuna.

Kriittinen kosteuspitoisuus

Kriittinen kosteuspitoisuus (w_{crit}) ilmaisee sen kosteuspitoisuuden, jonka yläpuolella kosteus siirtyy huokoisessa materiaalissa pääasiassa nestemuodossa yhtenäistä kapillaariverkostoa pitkin.

Kriittinen RH

Kriittinen RH (Relative Humidity = % RH) (ϕ_{crit}) on (huokos-)ilman suhteellisen kosteuden raja-arvo, jota ei saa ylittää, jotta homeen kasvu tai jokin muu rakenteessa tapahtuva haitallinen ilmiö voidaan ehkäistä. Arvo riippuu muun muassa tarkasteltavasta ilmiöstä, ympäröivistä olosuhteista (esimerkiksi lämpötila) sekä tarkasteltavasta materiaalista.

Kuivatus

Aktiivisesti tehostettua kuivumista, jolla rakenteen kuivumisaikaa pyritään lyhentämään vaikuttamalla rakenteeseen tai ympäröiviin olosuhteisiin.

Kuivuminen

Materiaalin sisältämän kosteuden poistumista materiaalista eri kosteuden siirtymismuodoilla

Kuivumisaika

Aika, joka kuluu rakennekosteuden alenemiseen alkukosteudesta tavoitekosteuspitoisuuteen.

Vesihöyryn kyllästyspitoisuus

Vesihöyryn kyllästyspitoisuus (v_{sat}) (kyllästyskosteuspitoisuus) ilmoittaa vesihöyrypitoisuuden, jonka ilma voi sitoa tietyssä lämpötilassa.

Lämmönjohtavuus

Lämmönjohtavuus (λ) ilmoittaa lämpömäärän, joka stationääritilassa läpäisee aikayksikössä pinta-alayksikön suuruisen ja pituusyksikön paksuisen homogeenisen ainekerroksen, kun ainekerroksen eri puolilla olevien ilmatilojen lämpötilaero on yksikön suuruinen.

Maksimikosteuspitoisuus

Maksimikosteuspitoisuus (w_{max}) saavutetaan, kun materiaalin koko huokostilavuus on veden täyttämä.

Ominaislämpökapasiteetti

Ominaislämpökapasiteetti (c_p) kuvaa materiaalin kykyä sitoa lämpöä.

Pintadiffuusio

Pintadiffuusiolla tarkoitetaan vesimolekyylien siirtymistä materiaalihuokosten pinnoilla enemmän vesimolekyyliä sisältävistä kohdista ”pomppimalla” vähemmän vesimolekyyliä sisältäviin kohtiin. Siirtyminen tapahtuu vesimolekyylin irrotessa adsorboituneen molekyylikerroksen pinnasta huokosilmaan ja siirtyessä takaisin pintaan sellaisessa kohdassa, jossa pinnan sidosvoimat ovat suuremmat kuin alkuperäisessä paikassa. Pintadiffuusio tapahtuu aina samaan suuntaan kuin kapillaarivirtaus.

Rakennekosteus

Rakennekosteudella tarkoitetaan sitä rakennusaikaista kosteutta, joka poistuu rakenteesta ennen kuin se on tasapainossa sitä ympäröivän ilman kosteuden kanssa eli saavuttaa tasapainokosteuden.

Suhteellinen diffuusiovastuskerroin

Suhteellinen diffuusiovastuskerroin (s_d) ilmoittaa seisovan ilmakerroksen paksuuden, jonka vesihöyryn vastus on yhtä suuri, kuin tarkasteltavan tasapaksun ainekerroksen tai tällaisista kerroksista muodostuvan kerroksellisen rakenteen vesihöyrynvastus. Suhteellinen diffuusiovastus saadaan kertomalla ainekerroksen vesihöyryn diffuusiovastuskerroin ainekerroksen paksuudella $s_d = \mu \cdot d$

Suhteellinen kosteus

Ilman suhteellinen kosteus (Relative Humidity = %RH) (ϕ) ilmoittaa, kuinka paljon ilmassa on vesihöyryä vesihöyryn kyllästyspitoisuuteen verrattuna (tai kuinka paljon vesihöyryn osapaine on vesihöyryn kyllästysosapaineeseen verrattuna) tietyssä lämpötilassa.

Vapaa diffuusio

Vapaassa diffuusiassa materiaalin huokoset ovat niin suuria verrattuna siirtyvien molekyylien kokoon, että molekyylit törmäilevät lähinnä toisiinsa.

Vesi-kipsisuhde

Vesi-kipsisuhde (v/k tai W/G) on kipsimassan sisältämän vesimäärän ja kipsin painon suhde. (vrt. vesi-sementtisuhde (v/s tai W/C) betonissa)

Vesihöyryn kyllästysosapaine

Vesihöyryn kyllästysosapaine ($p_{v,sat}$) ilmoittaa vesihöyryn osapaineen, joka ilmassa voi enintään olla tietyssä lämpötilassa

Vesihöyryn osapaine

Vesihöyryn osapaine (p_v) ilmoittaa vesihöyryn vaikutuksesta syntyvän paineen ilmassa.

Vesihöyrynläpäisevyys

Vesihöyrynläpäisevyys (δ_v tai δ_p) ilmoittaa vesihöyrymäärän, joka stationääritilassa läpäisee aikayksikössä pinta-alayksikön suuruisen ja pituusyksikön paksuisen homogeenisen ainekerroksen, kun vesihöyrypitoisuusero (tai vesihöyryn osapaine-ero) ainekerroksen eri puolilla on yksikön suuruinen.

Vesihöyrynvastus

Vesihöyrynvastus (Z_v tai Z_p) ilmoittaa stationääritilassa ainekerroksen tai rakennusosan eri puolilla olevan vesihöyrypitoisuuseron (tai vesihöyryn osapaine-eron) ja ainekerroksen tai rakennusosan läpi kulkevan kosteusvirran tiheyden suhteen. Homogeenisen ainekerroksen vesihöyrynvastus saadaan jakamalla kerroksen paksuus sen vesihöyrynläpäisevyydellä $Z = d / \delta$.

Vesihöyrypitoisuus

Vesihöyrypitoisuus (v) tarkoittaa ilman sisältämän vesihöyryn määrää tilavuuteen suhteutettuna. Vesihöyrypitoisuuden lisäksi ilman sisältämää vesihöyrymäärää voidaan kuvata myös vesihöyryn osapaineen avulla.

1. JOHDANTO

Kipsi rakennusmateriaalina on tunnettu jo vuosisatoja ja huokoisten materiaalien kuivumistakin on tutkittu jo vuosikymmeniä. Kipsistä ja lisäaineista valmistettujen kipsilaastien ja -massojen ominaisuudet poikkeavat kuitenkin suuresti puhtaan kipsin ominaisuuksista, joten aiemmat tutkimustulokset eivät ole suoraan hyödynnettävissä. Rakenteiden rakennusfysikaalisen toimivuuden arviointi perustuu enenevässä määrin laskennallisiin tarkasteluihin, joten yksilöllisten materiaaliominaisuuksien tunteminen on oleellista, jotta kehittyneitä laskentatyökaluja voidaan hyödyntää tehokkaasti ja luotettavasti. Tarkkojen (hyvin totuutta kuvaavien) laskelmien perusteella materiaalien ja energian kulutusta voidaan optimoida ja tätä kautta tutkimuksella tuotetaan säästöä yksilöille ja yhteiskunnalle. Laskennallisten tarkastelujen verifioimiseksi tarvitaan edelleen todellisilla rakenteilla tehtyjä kokeita ja kenttämittauksia. Rakennekokeiden mittaustuloksia voidaan hyödyntää myös suoraan rakenteiden kuivumisaika-arvioissa sekä kehitettyjen laskentamallien testauksessa, joten kattavan seurantatutkimuksen toteuttaminen on perusteltua.

1.1 Tutkimuksen taustaa

Kosteutta sisältävien rakennusmateriaalien, erityisesti betonin, kuivumisajat määrittävät usein merkittävästi rakentamisaikataulua. Rakenteen tulee olla riittävän kuiva ennen pinnoitusta, mutta toisaalta liika kuivatus taas kuluttaa turhaan energiaa ja aiheuttaa rakentamisaajan venymistä. Liian kosteana pinnoitetussa rakenteessa saattaa ilmetä materiaali-vaurioita ja pahimmillaan liika kosteus johtaa sisäilmaongelmiin, joka uhkaa jo suoraan tilan käyttäjien terveyttä.

Tutkittavan lattiamassan kuivumisajasta on tällä hetkellä olemassa vain varsin rajallisesti tietoa. Materiaalivalmistajan ohjeiden mukaan lattia kuivuu n. 1 cm/vko, kun ympäröivän ilman lämpötila on n. 20 °C ja suhteellinen kosteus 65 % RH. Yli 5 cm paksuille lattia-valuille kuivumisajaksi annetaan 1 cm/1-2 vko samoissa olosuhteissa.

Kuivumisaika arvioissa ”sentti per viikko” ajattelumalli on nykyään liian epäluotettava, kun rakentamisaikoja pyritään lyhentämään ja työmaa-aikatauluja tarkentamaan. Kuivumisaajan venyessä myös muiden työvaiheiden aloitusta joudutaan siirtämään ja pahimmillaan näihin töihin varatut henkilöstöresurssit siirtyvät toiselle työmaalle, jolloin todellinen viivästys voi olla moninkertainen verrattuna kuivumisaika-arvion venymiseen.

Materiaalin nopea kuivuminen on tärkeä ominaisuus, mutta toisinaan vielä tärkeämpää on kuivumisen ennustettavuus. Myös aktiivisen kuivatuksen vaikutukset kuivumisaikoihin on syytä tuntea, jolloin kuivumisaikaan voidaan tarvittaessa vaikuttaa suunnitelmallisesti.

1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja rajaus

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää Knauf LM80 lattiamassalla valetun kelluvan kipsi-valulattian kuivumisaika vakio-olosuhteissa. Kuivumisaika määritetään valuhetkestä (alkukosteuspitoisuus) valittuihin tavoitekosteuspitoisuuksiin asti. Tutkimus perustuu seurantalutkimukseen, jossa tarkkaillaan rakennekoekappaleiden ja todellisten rakenteiden huokosilman suhteellisen kosteuden muutosta ajan funktiona.

Tässä tutkimuksessa ei selvitetä tutkittavan kipsimassan materiaaliominaisuuksia tai kuivumisvaiheiden kestoa, vaan päätavoitteena on ennalta määritettyjen rakenteiden kuivumisajan selvittäminen.

1.3 Tutkimuksen aikataulu, rakenne ja tutkimusmenetelmät

Ennen varsinaisen tutkimuksen aloitusta oli tilaajan kanssa määritetty, mitä tutkimuksella halutaan selvittää ja mitkä ovat keskeisimmät linjaukset tutkimuksen toteutukselle, laajuudelle ja tehtäville mittauksille.

Tutkimus aloitettiin kesäkuussa 2016 suunnittelemalla laboratoriokoejärjestelyt siten, että tilaajan kanssa määritetyt vaatimukset toteutuvat. Suunnitteluvaiheen jälkeen hankittiin tarvittavat materiaalit ja valmistettiin laboratoriokokeissa tarvittavat muotit varustettujen. Laboratoriokoejärjestelyt saatiin pääpiirteittäin valmiiksi kesäkuun loppuun mennessä. Heinäkuussa hankittiin ja kalibroitiin (säädettiin) laboratoriokokeissa tarvittavat mittauslaitteet. Elokuun alussa laboratoriokoekappaleet valettiin ja mittaukset aloitettiin. Laboratoriokokeet kestivät lopulta helmikuun 2017 loppuun asti.

Tutkimukseen sisältyi laboratoriokokeiden lisäksi kaksi kenttätutkimuskohdetta. Ensimmäinen kenttätutkimuskohde sijaitsee Kangasalla ja sitä seurattiin elokuun lopusta lokakuun alkuun asti. Toinen kenttätutkimuskohde sijaitsee Jyväskylässä ja sitä seurattiin marraskuun 2016 alusta tammikuun 2017 alkuun.

Tutkimusraportti on jaettu kahteentoista lukuun. Ensimmäisenä lukuna on johdanto, jossa esitellään tutkimuksen tavoitteet ja taustatiedot sekä tutkimuksen kulku pääpiirteittäin.

Toisessa luvussa käsitellään rakenteen kuivumista ja kosteuden käyttäytymistä ilmassa ja huokoisessa materiaalissa yleensä. Lisäksi tutustutaan aktiivisiin kuivatusmenetelmiin, joita on käytetty betonirakenteiden kuivaukseen ja joita voidaan hyödyntää myös kipsi-valurakenteen kuivatuksessa.

Kolmannessa luvussa esitellään kipsin ja nyt tutkittavan LM80 kipsimassan tunnettuja ominaisuuksia. Lukuun on koottu kirjallisuudesta löytyviä tutkimustuloksia rakennekip-sin ominaisuuksista sekä julkisista lähteistä löytyvät tiedot LM80 kipsimassasta. LM80 kipsimassan tarkempaa koostumusta ei selvitetä, koska kyseessä on tuotekehityksen tu-loksena aikaansaatu kaupallinen tuote. Luvussa esitellään lisäksi raaka-aineen lähteet sekä kipsin hydrataatioreaktio.

Luvussa neljä käsitellään tutkimuksessa tarvittavat rakennusfysikaaliset mittaukset sekä niihin käytettyjen laitteiden toimintaperiaatteet ja viidennessä luvussa esitellään tutki-mukseen valitut mittalaitteet ja mittausmenetelmät. Tutkimuksessa rakenteen kuivumista on seurattu perinteisen porareikämittauksen lisäksi valuun asennettujen mittausputkien kautta sekä valuun asennettavilla antureilla, jotka jäävät kiinteästi rakenteeseen. Kuivu-mista seurattiin myös kapasitanssiin perustuvalla kokeellisella mittausmenetelmällä.

Koejärjestelyt laboratoriossa ja kenttäkohteilla esitellään luvussa kuusi. Seitsemännessä luvussa käydään läpi kokeiden suoritus vastaavassa järjestyksessä kuin edellisessä kap-paleessa.

Kahdeksannessa luvussa julkaistaan kootusti tutkimuksen tärkeimmät tulokset havainnol-liseen muotoon muokattuna. Yksittäisten koekappaleiden ja kenttäkohteiden mittauspis-teiden mittaustulokset esitellään liitteissä selkeyden varmistamiseksi.

Esitettyjen tulosten luotettavuutta pyritään arvioimaan luvussa yhdeksän. Virhelähteinä esitellään mittauslaitteiston tarkkuuteen vaikuttavat tekijät sekä koejärjestelyjen ja eten-kin kenttämittausten häiriöherkkyys.

Kymmenennessä luvussa esitetään tavoitekosteuspitoisuuteen kuivuneen rakenteen kos-teusjakauma ja pinnoituksen vaikutus kosteusjakaumaan. Lisäksi pyritään erottamaan tu-loksista olosuhteiden, valun paksuuden ja lattialämmityksen vaikutukset kuivumisaikaan ja jäsennellään lopullinen kuivumisaika-arvio.

Yhdennessätoista luvussa esitellään kuivumistutkimuksen kannalta oleelliset jatko-tutkimukset ja viimeisessä eli kahdennessätoista kappaleessa koko tutkimuksesta muo-dostetaan tiivis yhteenveto.

Lisäksi tutkimusraportti sisältää alussa esitetyt määritelmät ja merkinnät sekä lopussa ole-van lähdeluettelon ja liitteet.

2. KOSTEUS ILMASSA JA HUOKOISESSA MATERIAALISSA

Yleisesti rakenteen kuivuminen tarkoittaa sitä, että rakenteesta poistuu enemmän kosteutta kuin siihen sitoutuu. Tässä tutkimuksessa tarkastellaan tuoreen kipsimassan kuivumista, joten nyt kuivumisella tarkoitetaan kemiallisesti sitoutumattoman, haihtumiskykyisen veden poistumista materiaalista, kun lähtötilanteena on alkukosteus. Yleensä kosteus siirtyy rakenteesta ympäröivään ilmaan, mutta mahdollista on myös, että kosteutta siirtyy suoraan materiaalista toiseen.

2.1 Kosteus ilmassa

Kuiva ilma koostuu pääasiassa typestä (~78 %) ja hapestä (~21 %), viimeisen prosentin sisältäessä muun muassa jalokaasuja sekä hiilidioksidia (Vinha 2011a s.42, Seppänen *et al.* 1999 s.142, Nevander & Elmarsson 2006 s.235). Ilmakehän alimmat kerrokset sisältävät myös vaihtelevat määrät vesihöyryä, joka kuivaan ilmaan sekoittuessaan syrjäyttää ilman muita kaasumolekyylejä ja kostuvan ilman koostumus muuttuu. Koska veden moolimassa on pienempi kuin ilman moolimassa, ilma on sitä kevyempää mitä enemmän se sisältää kosteutta (Björkholtz 1997 s.43). Tätä vesihöyryn keventävää vaikutusta ei rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa kuitenkaan yleensä oteta huomioon, vaan kosteuslaskelmissa ilman tiheytenä käytetään vakioarvoa $\rho_a = 1,2 \text{ kg/m}^3$, joka vastaa kuivan ilman tiheyttä +20 °C lämpötilassa. Tarkemmin kostean ilman tiheys voidaan laskea kaavalla 2.1 (Björkholtz 1997 s.46).

$$\rho_a = (P_n - p_v) * \frac{M_a}{R * T} + v \quad (2.1)$$

Kaavassa 2.1 ρ_a on ilman tiheys [kg/m^3], P_n on normaali ilmanpaine (kokonaispaine) [Pa], p_v on ilmassa olevan vesihöyryn osapaine [Pa], M_a on ilman moolimassa [kg/kmol], R on yleinen kaasuvakio ($8314,3 \text{ J/(kmol} \cdot \text{K)}$), T on kaasun lämpötila [K] ja v on ilman vesihöyrypitoisuus [kg/m^3]. Jos kaavassa käytetään vesihöyryn osapaineena kyllästysosapainetta ja vesihöyrypitoisuutena kyllästyspitoisuutta, niin kaavalla 2.1 saadaan tietyssä lämpötilassa vesihöyryllä kyllästyneen ilman tiheys $\rho_{a,\text{sat}}$ [kg/m^3].

Daltonin osapainelain (v. 1801) mukaan kaasuseoksen kokonaispaine tietyssä tilavuudessa on sen kaasujen osapaineiden summa. Epämääräisesti jakaantuneessa kaasuseoksessa kaasumolekyylit pyrkivät kaasujen osapaine-erojen vaikuttaessa siirtymään siten, että muodostuu tasaisesti jakaantunut kaasuseos (Siikanen 2014 s.71). Tässä tasoittumisilmiössä nettovirtaus tapahtuu korkeammasta pitoisuudesta (tai osapaineesta) matalampaan ja ilmiötä kutsutaan diffuusioksi (Vinha 2011b s.43).

Maanpinnan tasolla normaalina ilmanpaineena (kokonaispaineena) pidetään arvoa $P_n=101325$ Pa ja tämän kokonaispaineen muodostuminen on esitetty Daltonin osapainelain mukaisesti määritelmässä 2.2.

$$P_{tot} = \sum_{i=1}^n p_i$$

$$P_n = p_{N_2} + p_{O_2} + p_{Ar} + p_{CO_2} + \dots + p_v = 101325 Pa \quad (2.2)$$

Määritelmässä 2.2 on viimeisenä terminä esitetty vesihöyryn osapaine p_v [Pa], jonka avulla saadaan lopulta selville ilman vesihöyrypitoisuus v [kg/m³], suhteellinen kosteus ϕ [% RH] sekä muita kuivumistarkastelussa tarvittavia suureita.

Tunnetuista kaasulaeista Boylen laki (v. 1662), Charlesin laki (v. 1787) ja Gay-Lussacin laki (v. 1802)) on johdettu kaasujen yleinen tilanyhtälö (kaava 2.3), joka myös esitetään taulukkokirjoissa (Mäkelä 2005 s.184, Seppänen *et al.* 1999 s.115). Alla esitetty kaavan johto on esitetty muiden muassa lähteissä Hens 2007 s.143, Vinha 2011a s.43 ja Nevander & Elmarsson 2006 s.236-237.

$$pV = nRT = \frac{m}{M}RT \Rightarrow \frac{m}{V} = \frac{Mp}{RT} = \rho \quad (2.3)$$

Kaavassa 2.3 p on kaasun paine [Pa], V on kaasun tilavuus [m³], n on kaasun suhteellinen atomimassa [mol], R on yleinen kaasuvakio (8314,3 J/(kmol·K)), T on kaasun lämpötila [K], m on kaasun massa [kg], M on kaasun moolimassa [kg/kmol] ja ρ on kaasun tiheys [kg/m³].

Tietyssä tilavuudessa, paineessa ja lämpötilassa on aina sama määrä kaasumolekyylejä (Vinha 2011a s.43). Ideaalikaasun tilanyhtälöstä johtamalla saadaan näin ollen yhteys vesihöyrypitoisuuden v [kg/m³] ja vesihöyryn osapaineen p_v [Pa] välille (kaava 2.4) (Vinha 2011a s.43, Nevander & Elmarsson 2006 s.237)

$$v = \frac{M_w}{RT} p_v = \frac{M_w}{R(273,15+\theta)} p_v \quad (2.4)$$

Kaavassa 2.4, kaavaan 2.3 kaasun tiheyden ρ [kg/m³] tilalle on vaihdettu vesihöyrypitoisuus v [kg/m³], moolimassaksi M [kg/kmol] sijoitetaan veden moolimassa M_w (18,02 kg/kmol) ja kaasun paineeksi p [Pa] vesihöyryn osapaine p_v [Pa]. Lisäksi lämpötila on muutettu kelvineistä celsius asteiksi.

Koska veden moolimassa M_w ja yleinen kaasuvakio R ovat vakioita ja ne tunnetaan, voidaan kaava vielä sijoittamalla ja sieventämällä yksinkertaistaa kaavassa 2.5 esitettyyn muotoon (Björkholtz 1990 s.23, Hagentoft 2001 s.88, Siikanen 2014 s.68, Nevander & Elmarsson 2006 s.237).

$$v = \frac{p_v}{461,39 \cdot (273,15 + \theta)} \Leftrightarrow p_v = 461,39 \cdot (273,15 + \theta) \cdot v \quad (2.5)$$

Edellä esitettyjen muunnoskaavojen 2.4 ja 2.5 avulla on saatu yhteys vesihöyrypitoisuuden v [kg/m³] ja vesihöyryn osapaineen p_v [Pa] välille. Ilman vesihöyrypitoisuus v [kg/m³] pystytään määrittämään suhteellisen kosteuden ϕ [% RH] ja lämpötilan T [K] tai kastepistelämpötilan T_{dew} [K] mittauksen perusteella. Muunnoskaavoihin tarvittavia lähtötietoja voidaan selvittää myös epäsuorilla menetelmillä, esimerkiksi mittaamalla kosteuspitoisuuden aiheuttamia tunnettuja muutoksia väliaineessa (Vinha 2014 s.340).

Suhteellisen kosteuden määrittelyä varten on tunnettava vesihöyryn kyllästysosapaine $p_{v,\text{sat}}$ [Pa] tai ilman vesihöyryn kyllästyspitoisuus v_{sat} [kg/m³]. Vesihöyryn kyllästyspitoisuus riippuu suoraan ilman lämpötilasta ja mitä lämpimämpää ilma on, sitä enemmän se voi sisältää vesihöyryä (Siikanen 2014 s.70, Vinha 2011a s.44). Vesihöyryn kyllästyspitoisuus määräytyy kaasumaisen ja nestemäisen veden tasapainotilanteen perusteella (Vinha 2011a s.44).

Tässä tutkimuksessa tarkastellaan materiaalin kuivumista pääosin huonelämpötiloissa (n. +20 °C), joten vesihöyryn kyllästyspitoisuuden määrittäminen on yksiselitteistä. Jos vesihöyryn kyllästyspitoisuutta määritetään alle 0 °C lämpötiloissa, on huomioitava, tarkastellaanko tilannetta nestemäisen veden (esim. koski tai vastaava talvella sula vesi) vai jääkerroksen yläpuolella. Yleisesti oletetaan, että lämpötilan ollessa pakkasen puolella, maata peittää jää tai lumi, jolloin vesihöyryn kyllästyspitoisuus määritetään jään yli (Vinha 2011a s.44).

Ilman vesihöyryn kyllästyspitoisuuksia eri lämpötiloissa on taulukoitu lukuisissa lähteissä (Björkholtz 1990 s.24, Björkholtz 1997 s.44, EN 13788/2012 s.38, Hagentoft 2001 s.404, Hens 2007 s.146, Siikanen 2014 s.69, Vinha 2011a s.49). Useissa lähteissä esitellään myös laskentakaavoja, joilla vesihöyryn kyllästyspitoisuuden v_{sat} [kg/m³] tai kyllästysosapaineen p_{sat} [Pa] voi määrittää rajatulla lämpötila-alueella. Tässä yhteydessä esitellään muutamia näistä kaavoista ja perustellaan lopuksi tutkimukseen valitun kaavan käyttö. Rajataan esittely koskemaan kaavoja, jotka toimivat tämän tutkimuksen lämpötila-alueella (n. +20 °C) ja lasketaan myös kunkin kaavan antama tulos +20 °C lämpötilassa taulukkoon 2.1. Lämpötilarajauksen mukaisesti kaikki kaavat antavat veden yli laskettuja arvoja.

Lämpötila-alueella $\theta = -20^\circ\text{C} \dots +80^\circ\text{C}$ (Björkholtz 1997 s.43)

$$v_{\text{sat}}(\theta) = \left[4,85 + 3,47 \cdot \left(\frac{\theta}{10}\right) + 0,945 \cdot \left(\frac{\theta}{10}\right)^2 + 0,158 \cdot \left(\frac{\theta}{10}\right)^3 + 0,0281 \cdot \left(\frac{\theta}{10}\right)^4 \right] \quad (2.6)$$

Kaavassa 2.6 θ on lämpötila [°C]

Lämpötila-alueella $\theta = 0^\circ\text{C} \dots +30^\circ\text{C}$ (Hagentoft 2001 s.88, Nevander & Elmarsson 2006 s.239)

$$v_{\text{sat}}(\theta) = \frac{288,68 \cdot \left(1,098 + \frac{\theta}{100}\right)^{8,02}}{461,4 \cdot (\theta + 273,15)} \quad (2.7)$$

Kaavassa 2.7 θ on lämpötila [$^{\circ}\text{C}$]

Rajoittamattomalla lämpötila-alueella (Hens 2007 s.144)

$$p_{v,sat}(T) = p_{c,sat} * e^{[2,3026 * \kappa * (1 + \frac{T_c}{T})]} \quad (2.8)$$

Kaavassa 2.8 $p_{c,sat}$ on kriittiseen lämpötilaan liittyvä kyllästyspaine ($p_{c,sat}=217,5*10^5$ Pa), T_c on veden kriittinen lämpötila ($T_c=647,4$ K) (eli lämpötila, jonka yläpuolella vesi esiintyy pelkästään vesihöyrynä) ja T on lämpötila [K].

Kerroin κ lasketaan kaavalla 2.9.

$$\kappa(T) = 4,39553 - 6,2442 * \left(\frac{T}{1000}\right) + 9,953 * \left(\frac{T}{1000}\right)^2 - 5,151 * \left(\frac{T}{1000}\right)^3 \quad (2.9)$$

Kaavassa 2.9 T on lämpötila [K]

Lämpötila-alueella $\theta = 0^{\circ}\text{C} \dots +40^{\circ}\text{C}$ (Hens 2007 s.147)

$$p_{v,sat}(\theta) = 611 * e^{[72,5*10^{-3}*\theta - 288,1*10^{-6}*\theta^2 + 0,79*10^{-6}*\theta^3]} \quad (2.10)$$

Kaavassa 2.10 θ on lämpötila [$^{\circ}\text{C}$]

Lämpötila-alueella $\theta > 0^{\circ}\text{C}$ (Hens 2007 s.147)

$$p_{v,sat}(\theta) = 611 * e^{\left[\frac{17,08*\theta}{234,18+\theta}\right]} \quad (2.11)$$

Kaavassa 2.11 θ on lämpötila [$^{\circ}\text{C}$]

Lämpötila-alueella $\theta > 0^{\circ}\text{C}$ (EN 13788/2012 s.37, Vinha 2014 s.480)

$$p_{v,sat}(\theta) = 610,5 * e^{\left[\frac{17,269*\theta}{237,3+\theta}\right]} \quad (2.12)$$

Kaavassa 2.12 θ on lämpötila [$^{\circ}\text{C}$]

Taulukko 2.1 Vesihöyryn kyllästyspitoisuuden ja kyllästysosapaineen laskentakaavojen vertailu lämpötilan ollessa $+20^{\circ}\text{C}$

Laskentakaava	v_{sat} (g/m ³)	$p_{v,sat}$ (Pa)
2.6	17,2836	2337,7189
2.7	17,2867	2338,1382
2.8	16,9755	2296,0405
2.10	17,2706	2335,9571
2.11	17,4567	2361,1283
2.12	17,2779	2336,9511

Taulukossa 2.1 on esitetty eri laskentakaavoilla määritetyt vesihöyryn kyllästyspitoisuuden ja kyllästysosapaineen arvot $+20^{\circ}\text{C}$ lämpötilassa. Laskentakaavan antamasta arvosta on muunnoskaavalla 2.5 määritetty tuntematon paine tai kosteussisältö. Taulukosta havaitaan, etteivät laskentakaavojen tulokset eroa suuresti toisistaan.

Valitaan tässä tutkimuksessa käytettäväksi laskentakaavaksi kaava 2.12, koska se on esitetty uusimmassa lähteessä ja on samalla myös Suomessa vahvistetun standardin mukainen. Määritetään laskentakaavasta tuntemattomaksi jäävä kyllästyskosteus kaavalla 2.5.

Nyt kun tunnetaan ilman kyllästyskosteus ja kyllästysosapaine, voidaan määrittää ilman suhteellinen kosteus (Relative Humidity = RH) ϕ [% RH]. Ilman suhteellinen kosteus ϕ [%RH] ilmoittaa, kuinka paljon ilmassa on vesihöyryä kyllästyspitoisuuteen verrattuna (tai kuinka paljon vesihöyryn osapaine on vesihöyryn kyllästysosapaineeseen verrattuna) tietyssä lämpötilassa. Suhteellinen kosteus voidaan laskea ilman tiheyden, ilman vesihöyryn osapaineen tai ilman vesihöyrypitoisuuden perusteella kaavalla 2.13.

$$\phi = 100 * \frac{\rho_v}{\rho_{v,sat}}, \phi = 100 * \frac{p_v}{p_{v,sat}}, \phi = 100 * \frac{v}{v_{sat}} \quad (2.13)$$

Kaavan 2.13 tuloksena saadaan suhteellisen kosteuden arvot, jotka ilmoitetaan yksikössä [% RH]

2.2 Materiaalin huokoisuus ja sen määrittäminen

Huokoisessa materiaalissa vettä voi olla sekä kemiallisesti että fysikaalisesti sitoutuneena. Kemiallisesti sitoutunut vesi on osana aineen molekyylirakennetta ja sitä ei yleensä huomioida huokoisen materiaalin kosteuspitoisuudessa. Huokoisen materiaalin kosteudeksi sen sijaan luokitellaan materiaaliin fysikaalisesti sitoutunut vesi. (Nevander & Elmarsson 2006 s.241)

Koska kosteus esiintyy materiaalin huokosissa, on syytä ensin määritellä mitä materiaalin huokoisuus pohjimmiltaan tarkoittaa. Materiaalin huokoisuus ξ [-, %] tai ψ [-, %, m³/m³] kuvaa materiaalin huokostilavuuden V_{pores} [m³] suhdetta materiaalin koko tilavuuteen V_{tot} [m³] ja se voidaan määrittää kaavan 2.14 mukaisesti (Vinha 2011b s.14). Vaihtoehtoisesti huokoisuus voidaan määrittää tilavuusmittojen sijasta myös irtotiheyden ρ_{bulk} [kg/m³] tai näennäisen tiheyden ρ [kg/m³] ja kiintotiheyden ρ_{solid} [kg/m³] suhteena kaavojen 2.15 (Radu *et al.* 2012, Hens 2007 s.112) tai 2.16 (Hall & Hoff 2002 s.8) mukaisesti.

$$\psi = \frac{V_{pores}}{V_{tot}} \left[-, \%, \frac{m^3}{m^3} \right] \quad (2.14)$$

$$\xi = 1 - \frac{\rho - \rho_{gas}}{\rho_{solid} - \rho_{gas}} [-, \%] \quad (2.15)$$

$$\xi = \frac{\rho_{solid} - \rho_{bulk}}{\rho_{solid}} [-, \%] \quad (2.16)$$

Kaavassa 2.15 ρ_{gas} tarkoittaa materiaalihuokosissa olevan kaasun tiheyttä.

Materiaalin huokokset jaotellaan avoimiksi tai suljetuiksi, sen mukaan ovatko huokokset yhteydessä toisiinsa ja ympäröivään ilmaan siten, että kaasut ja/tai nesteet pystyvät siirtymään materiaalin sisällä huokosverkostoa pitkin. Esimerkiksi vesimolekyylin koko on noin $27...33 \cdot 10^{-10}$ m (0,27...0,33 nm), joten vesihöyryn siirtyminen vaatii tätä suuremmat huokokset. Toisaalta nestemäinen vesi koostuu suuremmista vesimolekyyli ryppäistä, joten materiaali voi olla vesitiivistä, vaikka se pystyisikin läpäisemään vesihöyryä (Hens 2007 s.111, Nevander & Elmarsson 2006 s.235, Świrski-Perkowska 2010 s.1).

Lähteessä (Hall & Hoff 2002 s.9-19) esitellään useita erilaisia huokostilavuuden mittaamenetelmiä, joista yleisin lienee uunikuivatun ja punnitun materiaalikoe kappaleen kylästämisen vedellä, jolloin materiaalin avoin huokostilavuus saadaan materiaaliin sitoutuneen veden massan ja tiheyden perusteella kaavan 2.17 avulla.

$$\xi = \frac{m_{sat} - m_{dry}}{V_{tot} \cdot \rho_{water}} [-, \%] \quad (2.17)$$

Uunikuivatun materiaalikoe kappaleen huokokset voidaan kyllästää painekammiossa tai keittämällä. Jos materiaalin huokosrakenne muuttuu veden vaikutuksesta, voidaan kylästysnesteinä käyttää erilaisia vedettömiä nesteitä (trikloorietaani, tetrakloorietaani, ksyleen, jne.) tai elohopeaa. Elohopea kyllästyksessä on käytettävä korkeaa painetta, joka osaltaan saattaa vaurioittaa materiaalin huokosrakennetta. (Hall & Hoff 2002 s.13)

Nesteellä kyllästämiseen perustuvissa menetelmissä huokosiin saattaa jäädä ilmataskuja, jotka aiheuttavat virhettä huokostilavuuden määrittämiseen. Nämä ilmataskut voidaan välttää, jos huokokset täytetään nesteen sijasta kaasulla. Lähteessä (Hall & Hoff 2002 s.13) esitellään materiaalikoe kappaleen huokostilavuuden määrittäminen heliumkaasun paineen muutokseen perustuvalla menetelmällä. Kun koelaitteiston tilavuus tunnetaan ja laitteistoon syötetään tunnettu määrä kaasua, voidaan yleisen kaasulain perusteella määrittää paine, joka laitteistossa vallitsee. Kun koelaitteiston sisälle laitetaan uunikuivattu materiaalikoe kappale ja laitteistoon syötetään taas sama määrä kaasua, samoissa olosuhteissa, mitattu paine on korkeampi, koska nyt kaasun tilavuus on materiaalin kiintotilavuuden verran pienempi. Paineiden erotuksesta pystytään yleisen kaasulain perusteella laskemaan materiaalikoe kappaleen kiintotilavuus ja kun koekappaleen kokonaistilavuus tunnetaan, saadaan selville materiaalikoe kappaleen huokostilavuus.

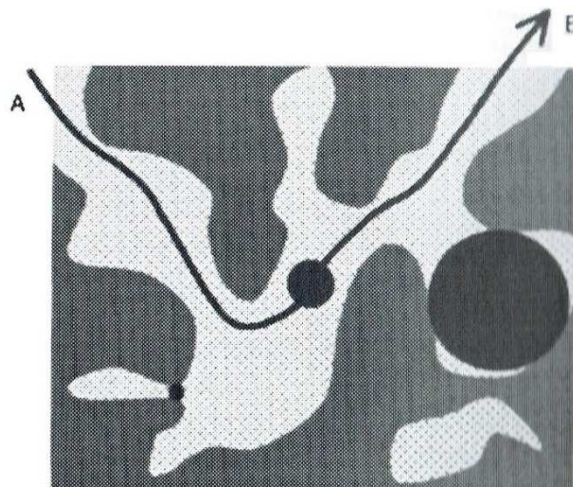
Heliumin viskositeetti on pieni ja helium molekyyleillä ei ole taipumusta sitoutua materiaalin pintoihin, joten se pystyy helposti täyttämään materiaalin avoimen huokosverkon. Helium molekyylin koko ($30 \cdot 10^{-12}$ m) on huomattavasti vesimolekyyliä pienempi, joten se myös pystyy täyttämään huokokset, joihin vesi ei pääse. Lähteessä (Hall & Hoff 2002 s.14) on verrattu erilaisten hiekka- ja kalkkikivien huokoisuuden mittaustuloksia, kun huokoisuuden määrittämiseen on käytetty vesikyllästystä painekammiossa ja edellä kuvattua heliumkaasumenetelmää. Tuloksista on havaittu, että heliumkaasulla mitattuna materiaalin huokoisuus on ollut keskimäärin 2,5 % suurempi kuin vedellä määritettynä.

Edellä kuvatut menetelmät soveltuvat luonnollisesti vain avoimen huokoisuuden määrittämiseen. Materiaalissa voi kuitenkin esiintyä myös suljettuja huokosia, jotka eivät vaikuta materiaalin kosteudensiirto-ominaisuuksiin, mutta muodostavat kuitenkin osan materiaalin huokostilavuudesta. Suljettuja huokosia voi muodostua, jos materiaaliin jää valmistusvaiheessa kaasukuplia, jotka pysyvät erillään ja säilyttävät rakenteensa materiaalin kehittyessä lopulliseen muotoon (esimerkiksi solumuovieristeet).

Materiaalin huokosrakenteeseen saattaa muodostua suljettuja huokosia tai huokosrypäitä myös silloin, jos materiaali sintrautuu tai sulaa osittain. Huokosissa kulkeutuvat, huokosveteen liuenneet, epäpuhtaudet saattavat tukkia huokosia ja joissain materiaaleissa kuiva kiintoaine voi reagoida veden kanssa, jolloin muodostuvat hydrataation reaktiotuotteet voivat tukkia aiemmin avoimia huokosia.

Materiaalin kokonaishuokostilavuutta, eli avoimien ja suljettujen huokosten yhteismäärää, voidaan selvittää esimerkiksi röntgenkuvauksella. Suomessa betonin huokosmäärän ja huokosrakenteen selvitykseen on perinteisesti käytetty ohuthietutkimusta, joka paljastaa suljettujen huokosten olemassaolon. Huokoisuus voidaan määrittää myös koekappaleen tiheyden perusteella, jos materiaalin kiintotiheys tunnetaan tarkasti.

Materiaalin kosteudensiirto-ominaisuuksiin vaikuttavat huokostilavuuden lisäksi huokosten koko, huokosjakauma sekä huokosseinämän yhteenlaskettu pinta-ala A_{pores} [m^2/kg]. Materiaalin huokokset voidaan jaotella kosteudensiirtymisominaisuuksiensa perusteella adsorptiohuokosiin ($d < 0,1 \mu\text{m}$), kapillaarihuokosiin ($0,1 \mu\text{m} < d < 10 \mu\text{m}$) ja gravitaatiohuokosiin ($d \gg 10 \mu\text{m}$) (Vinha 2011b s.14). Monimutkaisessa huokosrakenteessa kosteudensiirtymisnopeutta määrittää myös huokosrakenteen mutkittelevuus τ (eng. *tortuosity*), joka kuvaa sitä, kuinka suoraa reittiä kosteus pystyy siirtymään materiaalissa pisteestä A pisteeseen B (Hall & Hoff 2002 s.24). Kuvassa 2.1 on esitetty huokosrakenteen ominaisuuksia.

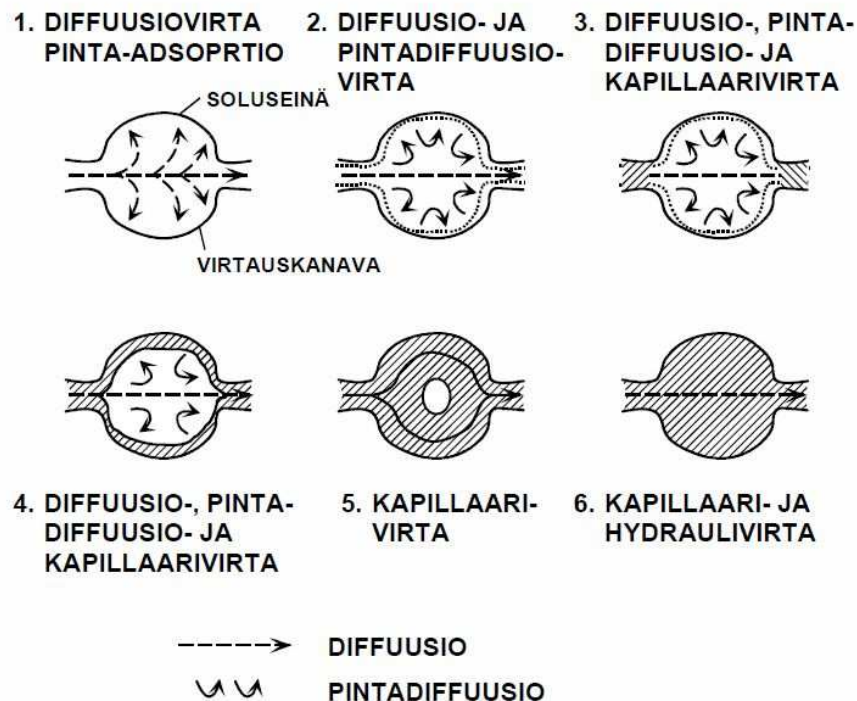


Kuva 2.1 Huokosrakenteen ominaisuuksia (Hall & Hoff 2002 s.24). Mutkittelevuus kuvaa, kuinka suoraa reittiä molekyyli voi siirtyä huokosrakenteessa.

2.3 Kosteus huokoisessa materiaalissa

Jos huokoisen materiaalin ja sen ympäristön välillä ei vallitse kosteustekninen tasapainotilanne, kosteutta siirtyy jatkuvasti joko materiaalista ympäristöön (desorptio) tai ympäristöstä materiaaliin (absorptio) tai materiaalihuokosten pinnoille (adsorptio). Rakennustekniikassa huokoisen materiaalin ympäristönä voi olla (kosteas)ilma, vesi tai toinen materiaali. (Björkholtz 1997 s.52)

Tarkastellaan seuraavaksi veden esiintymistä huokoisessa materiaalissa täysin kuivasta tilanteesta kohti täysin märkää, kyllästynyttä tilannetta. Tärkeimmät kosteuden siirtymismuodot on esitetty kuvassa 2.2.



Kuva 2.2 Kosteuden siirtymismuodot huokoisessa materiaalissa (Vinha 2011b s.41, katso VTT raportti).

Täysin kuivassa materiaalissa ei esiinny lainkaan vettä ja huokostilavuus on täynnä täysin kuivaa ilmaa (0 % RH), mutta käytännössä tällainen tilanne on erittäin hankalaa saavuttaa. Tästä syystä materiaaleille määritetäänkin nimellisesti kuiva tilanne (w_0 , u_0 , ψ_0), joka pystytään käytännössä saavuttamaan toistettavissa olevalla kuivausmenetelmällä.

Toistettavia menetelmiä ovat esimerkiksi materiaalin kuivaus uunissa tai hiilidioksidijään (kuivajään) avulla. Käytettävä kuivausmenetelmä on valittava tutkittavan materiaalin ominaisuuksien mukaisesti, ettei materiaalin koostumusta tai ominaisuuksia muuteta kui-

vauksen aikana. Esimerkiksi betonia ja maa-aineksia voidaan kuivata yleensä 105°C lämpötilassa ilman muutoksia, mutta kipsistä saattaa irrota kemiallisesti sitoutunutta vettä jo 40°C lämpötilassa. (Hall & Hoff 2002 s.30-37)

2.3.1 Vesihöyryn siirtyminen huokoisessa materiaalissa

Kun materiaaliin alkaa siirtyä kosteutta ympäristöstä diffuusiolla, huokosilman suhteellinen kosteus nousee ja materiaalissa esiintyy vettä ensin vain vesihöyrynä, joka tosin välittömästi alkaa sitoutua huokosten pinnoille. Vapaassa diffuusiossa vesihöyryn kosteusvirran tiheys g [$\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$] voidaan laskea kaavalla 2.18, joka on Fick'n ensimmäisen lain yksidimensioiden sovellus. Fickin lain mukaan kosteusvirta aiheutuu vesihöyrypitoisuuseroista. (Nevander & Elmarsson 2006 s.260, Leivo & Rantala 2002 s.16)

$$g(v) = -\delta_v \frac{dv}{dx} \quad (2.18)$$

Kaavassa 2.18 g on kosteusvirran tiheys [$\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$], δ_v on materiaalin vesihöyrynläpäisevyys vesihöyrypitoisuuden avulla ilmoitettuna [m^2/s] ja suhdeluku (dv/dx) on gradientti, joka ilmaisee vesihöyrypitoisuuden muutoksen pituusyksikköä kohti virtauksen suunnassa. Gradientti toimii kosteusvirran ajavana voimana. (Nevander & Elmarsson 2006 s.260)

Vesihöyrynläpäisevyyden arvoihin pätee sama yhteys, joka vallitsee vesihöyryn osapaineen ja vesihöyrypitoisuuden välillä. Kaavaa 2.5 soveltamalla saadaan muunnoskaava 2.19, jonka avulla vesihöyrynläpäisevyyden arvo voidaan muuttaa potentiaalista toiseen. (Nevander & Elmarsson 2006 s.260, Leivo & Rantala 2002 s.16)

$$\delta_p = \frac{\delta_v}{461,39 \cdot (273,15 + \theta)} \Leftrightarrow \delta_v = 461,39 \cdot (273,15 + \theta) \cdot \delta_p \quad (2.19)$$

Kaavassa 2.19 δ_p on materiaalin vesihöyrynläpäisevyys vesihöyrypitoisuuden avulla ilmoitettuna [$\text{kg}/(\text{mPa})$], δ_v on materiaalin vesihöyrynläpäisevyys vesihöyrypitoisuuden avulla ilmoitettuna [m^2/s] ja θ on lämpötila [$^{\circ}\text{C}$]

Kosteusvirran tiheys voidaan määrittää myös vesihöyryn osapaine-eron perusteella kaavan 2.20 mukaisesti

$$g(p_v) = -\delta_p \frac{dp_v}{dx} \quad (2.20)$$

Kaavassa 2.20 g on kosteusvirran tiheys [$\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$], δ_p on materiaalin vesihöyrynläpäisevyys vesihöyryn osapaineen avulla ilmoitettuna [$\text{kg}/(\text{mPa})$] ja suhdeluku (dp_v/dx) on gradientti, joka ilmaisee vesihöyryn osapaineen muutoksen pituusyksikköä kohti virtauksen suunnassa. Gradientti toimii kosteusvirran ajavana voimana. (Nevander & Elmarsson 2006 s.260)

Jos kosteusvirta kulkee stationääritilassa koko materiaalikerroksen läpi, kosteusvirran tiheys voidaan laskea kaavoilla 2.21 ja 2.22. (Nevander & Elmarsson 2006 s.263, Vinha 2011b s.53)

$$g(v) = -\delta_v \frac{v_2 - v_1}{d} = \frac{v_2 - v_1}{d/\delta_v} = \frac{v_2 - v_1}{Z_v} \quad (2.21)$$

Kaavassa 2.21 g on kosteusvirran tiheys [$\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$], δ_v on materiaalin vesihöyrynläpäisevyys vesihöyrypitoisuuden avulla ilmoitettuna [m^2/s], v_1 ja v_2 ovat materiaalin eri puolilla vaikuttavat vesihöyrypitoisuudet [kg/m^3], d on materiaalikerroksen paksuus [m] ja Z_v on materiaalin vesihöyrynvastus vesihöyrypitoisuuden mukaisesti ilmoitettuna [s/m].

$$g(p_v) = -\delta_p \frac{p_{v2} - p_{v1}}{d} = \frac{p_{v2} - p_{v1}}{d/\delta_p} = \frac{p_{v2} - p_{v1}}{Z_p} \quad (2.22)$$

Kaavassa 2.22 g on kosteusvirran tiheys [$\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$], δ_p on materiaalin vesihöyrynläpäisevyys vesihöyryn osapaineen avulla ilmoitettuna [$\text{kg}/(\text{m}^2\text{sPa})$], p_{v1} ja p_{v2} ovat materiaalin eripuolilla vaikuttavat vesihöyryn osapaineet [Pa], d on materiaalikerroksen paksuus [m] ja Z_p on materiaalin vesihöyrynvastus vesihöyryn osapaineen mukaisesti ilmoitettuna [$\text{m}^2\text{sPa}/\text{kg}$].

Kerroksellisessa rakenteessa materiaalikerrosten vesihöyrynvastukset voidaan laskea yhteen, jolloin sen läpi kulkevan kosteusvirran tiheys voidaan määrittää kaavalla 2.23

$$g(v) = \frac{v_i - v_e}{\Sigma Z_v} \quad (2.23)$$

Kaavassa 2.23 g on kosteusvirran tiheys [$\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$], v_i on rakenteen sisäpuolinen vesihöyrypitoisuus [kg/m^3], v_e on rakenteen ulkopuolinen vesihöyrypitoisuus [kg/m^3] ja ΣZ_v on materiaalikerrosten vesihöyrynvastusten summa vesihöyrypitoisuuden mukaisesti ilmoitettuna [s/m]. Vesihöyrynvastusten summaan lasketaan mukaan sisäpuolen pintavastus Z_i , ulkopuolen pintavastus Z_e sekä kaikkien rakennekerrosten vesihöyrynvastukset $Z = \Sigma(d/\delta_v)$. Rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa sisäpuolen pintavastukselle voidaan käyttää arvoa $Z_i = 360 \text{ s}/\text{m}$ ja ulkopuolen pintavastukselle arvoa $Z_e = 60 \text{ s}/\text{m}$. (Vinha 2011b s.55, Hagentoft 2001 s.107)

Epästationääritilanteessa olosuhteet muuttuvat ajan kuluessa. Esimerkiksi kuivumistarkasteluissa rakenteen sisäosien kosteuspitoisuus pienenee, jolloin myös kosteusvirta pienenee jatkuvasti. Tällöin laskennallisten tarkastelujen helpottamiseksi tarvitaan materiaalin kosteuspitoisuuden muutosnopeutta kuvaava termi kosteusdiffusiviteetti D_w [m^2/s].

Hygroskooppisella alueella kosteusdiffusiviteetti voidaan määrittää kaavalla 2.24.

$$D_w = \frac{\delta_v v_{sat}(T)}{dw/d\varphi} = \frac{\delta_v v_{sat}(T)}{\xi} \quad (2.24)$$

Kaavassa 2.24 D_w on kosteusdiffusiviteetti [m^2/s], δ_v on materiaalin vesihöyrynläpäisevyys vesihöyrypitoisuuden avulla ilmoitettuna [m^2/s], dw on materiaalin kosteuspitoisuuden muutos, $d\phi$ on suhteellisen kosteuden muutos ja ξ on materiaalin kosteuskapasiteetti hygroskooppisella alueella [kg/m^3]. Kuten suhdeluvusta nähdään, kosteuskapasiteetti on hygroskooppisen tasapainokosteuskäyrän kulmakerroin. (Nevander & Elmarsson 2006 s.262, Vinha 2011b s.101-102)

Kosteusdiffusiviteetin avulla epästationääritilanteen kosteusvirran tiheys voidaan esittää kaavalla 2.25, jonka ratkaisuun on yleensä käytettävä numeerisia menetelmiä (Leivo & Rantala 2002 s.17)

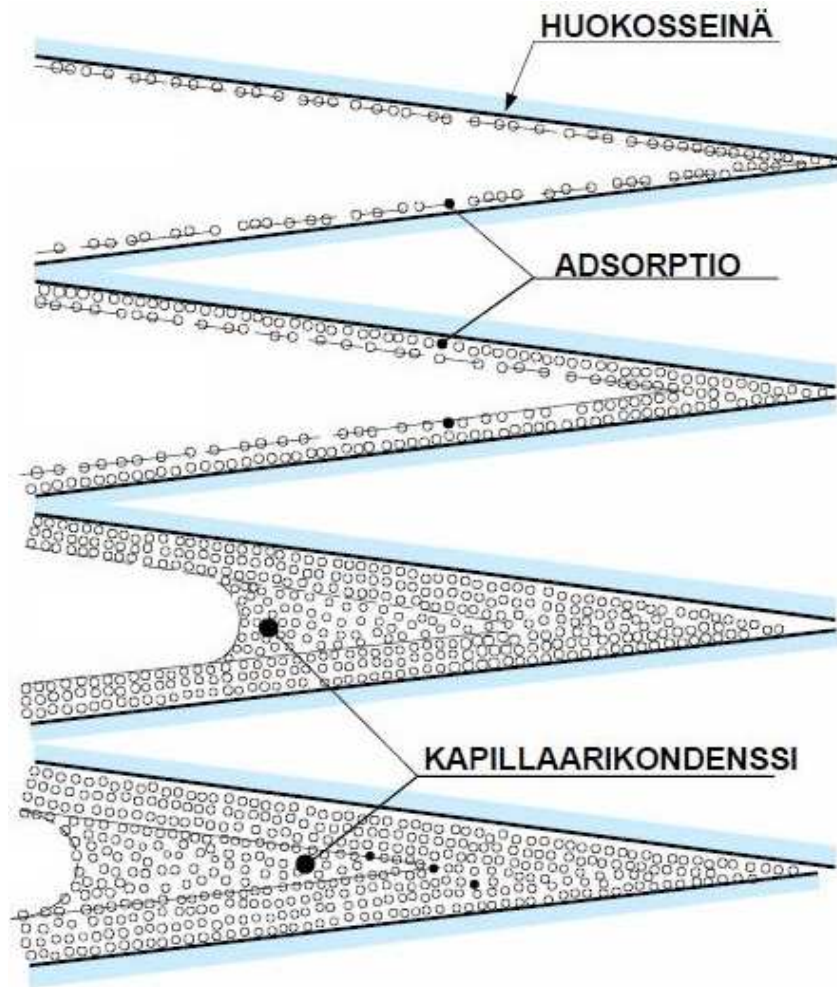
$$g = -D_w \frac{dw}{dx} \quad (2.25)$$

Kaavassa 2.25 g on kosteusvirran tiheys [$\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$], D_w on kosteusdiffusiviteetti [m^2/s] ja suhdeluku (dw/dx) on gradientti, joka ilmaisee materiaalin kosteuspitoisuuden muutoksen pituusyksikköä kohti virtauksen suunnassa. (Nevander & Elmarsson 2006 s.262)

2.3.2 Vesihöyryn sitoutuminen huokoiseen materiaaliin

Kuvassa 2.3 on esitetty, kuinka huokosilman suhteellisen kosteuden kasvaessa huokosseinämien pintaan alkaa sitoutua (adsorpoitua) vesimolekyylejä ensin yhteen kerrokseen (monomolekylaarinen adsorptio). Suhteellisen kosteuden edelleen kasvaessa, huokosseinämän pinnalle sitoutuva molekyylikerros kasvaa useamman molekyylin paksuiseksi kerrokseksi (polymolekylaarinen adsorptio). Kun molekyylikerros huokosseinämän pinnalla edelleen kasvaa, alkavat vesimolekyylien pintavoimista koostuvat sidosvoimat pienentyä ja lopulta vesimolekyyli voi irrota takaisin huokosilmaan (Vinha 2011b s.112).

Kapeimmissa huokosissa alkaa ilmetä tässä vaiheessa jo kapillaarikondensssia eli huokosiin muodostuu ”vapaata” vettä (kuva 2.3). Huokoskoon ja huokosilman suhteellisen kosteuden lisäksi veden sitoutumiseen vaikuttaa aineen kemiallinen luonne, eli onko materiaali luonteeltaan hydrofiilinen vai hydrofobinen. Adsorptiolla sitoutuvan veden määrään vaikuttaa luonnollisesti myös aineen huokosverkoston ominaispinta-ala A_{pores} [m^2/kg].



Kuva 2.3 Vesimolekyylien sitoutuminen materiaalihuokosen pintaan. (Vinha 2011b s.11) Huokosilman suhteellisen kosteuden ollessa alhainen, huokosen pintaan adsorpoituu vesimolekyyliä yhteen kerrokseen (monomolekylaarinen adsorptio). Huokosilman suhteellisen kosteuden kasvaessa myös huokosseinämän pintaan tiivistyy vesimolekyyliä useampaan kerrokseen (polymolekylaarinen adsorptio). Huokosilman suhteellisen kosteuden ja molekyylikerroksen edelleen kasvaessa, kapeimpiin huokosiin muodostuu lopulta vapaata vettä kapillaarikondenssilla ja huokokset alkavat täyttyä vedellä.

Lähteissä (Vinha 2011b s.88, Hall & Hoff 2002 s.41) on esitetty Kelvinin lakiin perustuva kaava 2.26, jonka avulla voidaan laskea, kuinka korkea huokosilman suhteellisen kosteuden on oltava, jotta kapillaarikondensssia tapahtuu.

$$\ln \varphi = - \frac{s M_w}{\rho_w R T} \quad (2.26)$$

Kaavassa 2.26 φ on suhteellinen kosteus [% RH], s on huokosalipaine [Pa], M_w on veden moolimassa [kg/kmol], ρ_w on veden tiheys tarkastelulämpötilassa [kg/m³], R on yleinen kaasuvakio (8314,3 J/(kmol·K)) ja T on lämpötila [K].

Kaavassa 2.26 tarvittava huokosalipaine voidaan laskea kaavalla 2.27 (Vinha 2011b s.85)

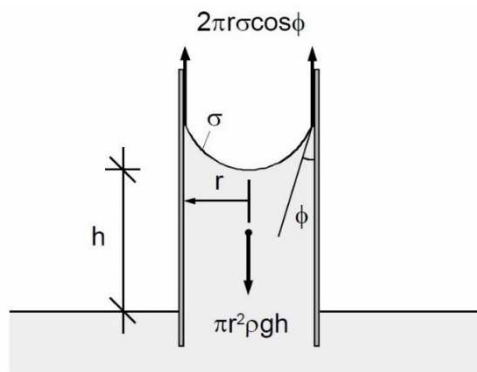
$$s = \frac{2\sigma_w}{r} \cos \phi \quad (2.27)$$

Kaavassa 2.27 s on huokosalipaine [Pa], σ_w on veden pintajännitys [N/m], r on huokosputken säde [m] ja ϕ on reunakulma vesipinnan meniskuksen ja huokosputken seinämän välillä [°]. Merkinnät on esitetty kuvassa 2.4.

Veden pintajännitykselle on esitetty lämpötilariippuvuuden kaava 2.28 lähteessä (Nevander & Elmarsson 2006 s.473)

$$\sigma_w \approx 78 * (1 - 0,0032 * \theta) * 10^{-3} \text{ [N/m]} \quad (2.28)$$

Kaavassa 2.28 σ_w on veden pintajännitys [N/m] ja θ on veden lämpötila [°C]



Kuva 2.4 Huokosalipaineen muodostuminen (Vinha 2011b s.85).

Kuvassa h on kapillaarinen nousukorkeus [m], r on huokosputken säde [m], σ on veden pintajännitys [N/m], g on putoamiskiihtyvyys [m/s^2], ρ on veden tiheys [kg/m^3] ja ϕ on reunakulma vesipinnan meniskuksen ja putken seinämän välillä [°].

Reunakulmaksi voidaan kapillaarisilla rakennusmateriaaleilla olettaa 0° , jolloin $\cos(0)=1$ (Vinha 2011b s.86). Oletetaan nyt reunakulmaksi 0° ja tarkastellaan tilannetta 20°C lämpötilassa.

Yhdistetään kaavaan 2.29 kaavat 2.27 ja 2.28, sijoitetaan kaavaan valinnan perusteella tunnetut arvot ($M_w=18,02 \text{ kg/kmol}$, $\rho_w(20^\circ\text{C})=998,20 \text{ kg/m}^3$, $R=8314,3 \text{ J/(kmol}\cdot\text{K)}$, $T=293,15 \text{ K}$, $\sigma_w=0,073 \text{ N/m}$ ja $\phi=0^\circ$) ja lasketaan suhteellisen kosteuden raja-arvoja muutamilla eri huokossäteillä taulukkoon 2.2.

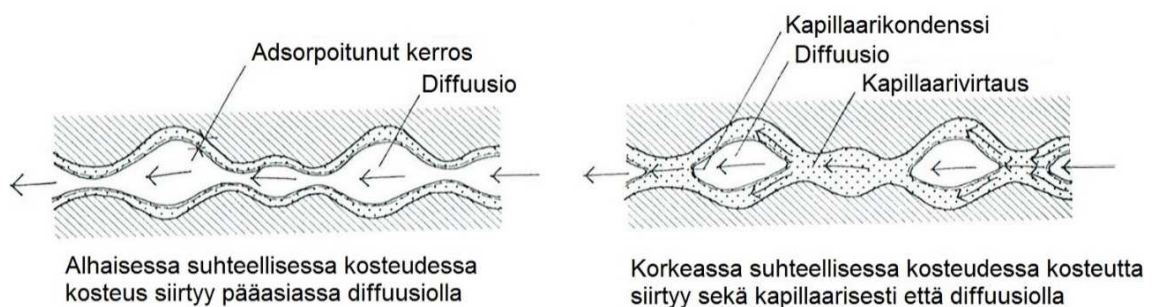
$$\varphi = e^{-\frac{2*\sigma_w*M_w}{r*\rho_w*R*T}} \quad (2.29)$$

Taulukko 2.2 Kaavan 2.29 mukaisesti laskettuja kapillaarikondenssin esiintymisen kannalta kriittisiä suhteellisen kosteuden arvoja

Huokossäde, r (m)	Kriittinen RH, ϕ (%)
1,00E-09	33,913 %
1,00E-08	89,750 %
1,00E-07	98,924 %
1,00E-06	99,892 %
1,00E-05	99,989 %
1,00E-04	99,999 %
1,00E-03	100,000 %

Kapillaarikondenssin lisääntyessä pienimmät huokokset ($d < 0,1 \mu\text{m}$) alkavat täyttyä vedellä ja suuremmissakin huokosissa huokosilman osuus huokostilavuudesta pienenee samalla kun huokosveden osuus huokostilavuudesta kasvaa. Kun materiaaliin absorboituu edelleen lisää vettä, huokosilman suhteellinen kosteus nousee ja lopulta saavutetaan hygroskooppinen kyllästyskosteuspitoisuus w_{hygr} . Hygroskooppinen kyllästyskosteuspitoisuus w_{hygr} ilmaisee sen kosteuspitoisuuden, jonka huokoinen materiaali voi saavuttaa sitomalla kosteutta pelkästään ympäröivästä ilmasta ja se saavutetaan, kun huokosilman suhteellinen kosteus on $\sim 98 \%$ RH (Hagentoft 2001 s.91, Vinha 2011b s.10, Lähteessä Hens 2007 s.115 $w_{\text{hygr}}=95\ldots 98 \%$ RH).

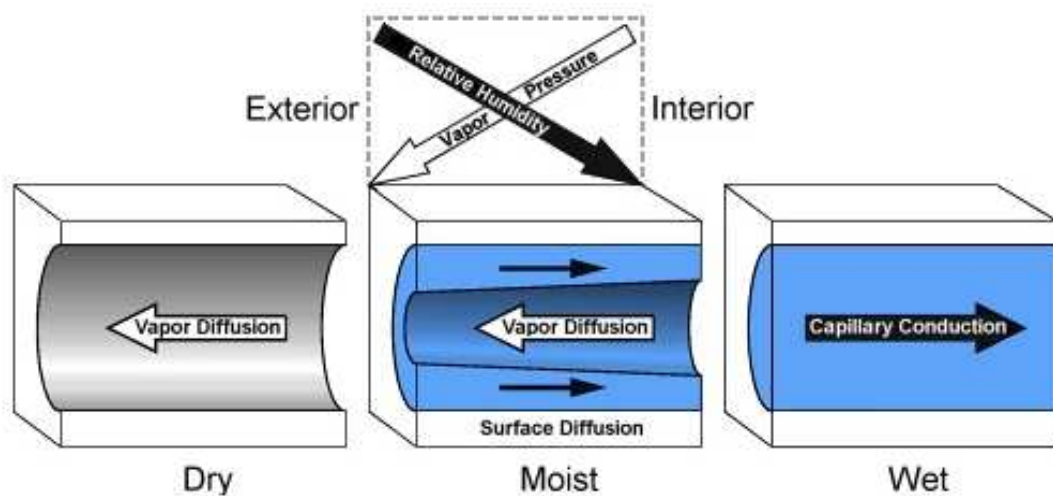
Kapillaarikondenssin muodostuminen vaikuttaa kosteuden siirtymisnopeuteen, koska kosteuden siirtyminen pelkällä diffuusiolla on erittäin hidasta verrattuna kapillaariseen kosteudensiirtymiseen. (Merikallio 2009 s.22) Kapillaarikondenssin vaikutusta kosteuden siirtymiseen huukoissa materiaalissa on havainnollistettu kuvassa 2.5.



Kuva 2.5 Kapillaarikondenssin vaikutus kosteuden siirtymiseen huukoissa materiaalissa (Perustuu lähteisiin Nevander & Elmarsson 2006 s.334, Merikallio 2009 s.22).

Huomioitava on myös, että jos rakenteen yli vaikuttaa lämpötilaero, kaasudiffuusio voi tapahtua eri suuntaan kuin pintadiffuusio ja kapillaarivirtaus. Tämä johtuu siitä, että kaasudiffuusion potentiaalina on vesihöyrypitoisuus v [kg/m^3] tai vesihöyryn osapaine p_v [Pa], mutta pintadiffuusion ja kapillaarivirtauksen potentiaalina on kosteuspitoisuus (w , u , ψ) tai huokosilman suhteellinen kosteus [% RH]. Tämän takia kosteuden siirtymi-

sen tarkastelussa tarvitaan aiemmin määritelty kosteusdiffusiviteetti vesihöyrynläpäisevyyden lisäksi. (Vinha 2011b s.51) Kuvassa 2.6 on havainnollistettu eri suuntaan kulkevat kosteusvirrat.



Kuva 2.6 Koska eri kosteudensiirtymismuodoilla on eri potentiaalit, myös kosteusvirta voi olla eri suuntaan. Pintadiffuusio ja kapillaarivirtaus tapahtuvat aina samaan suuntaan, mutta vesihöyry voi siirtyä "vastavirtaan". (Wufi Pro 5.2 käyttöohje).

Hygrooskooppista kyllästyskosteuspitoisuutta korkeampia kosteuspitoisuuden arvoja voidaan saavuttaa vain, jos huokoinen materiaali on kosketuksissa nestemäiseen veteen, jolloin materiaaliin alkaa siirtyä vettä kapillaarisesti. Kapillaarisen kosteudensitoutumisen seurauksena materiaalin kosteuspitoisuus edelleen kasvaa ja tietyssä kohdassa saavutetaan kriittinen kosteuspitoisuus w_{crit} , jonka yläpuolella kosteus siirtyy aineessa pääosin nestemuodossa yhtenäistä kapillaariverkostoa pitkin (Vinha 2011b s.10).

2.3.3 Nestemäisen veden siirtyminen huokoisessa materiaalissa

Kapillaarisuus tarkoittaa materiaalin kykyä siirtää vettä ohuissa materiaalihuokosputkissa vaikuttavien kapillaarivoimien (kuten adheesio ja koheesio) vaikutuksesta huokosputkien täyttyessä kokonaan vedellä. Kapillaarivoimat synnyttävät huokosputken vesipintaan kapillaari-imupaineen (huokosalipaineen), jonka ansiosta vesi voi siirtyä huokosputkessa eteenpäin. Kapillaari-ilmiön luonteeseen kuuluu, että vesi imeytyy pieniin huokosiin hitaasti, mutta suurella imuvoimalla ja suuriin huokosiin nopeasti, mutta pienellä imuvoimalla. Ylöspäin mentäessä kapillaarinen kosteuden siirtyminen loppuu, kun huokosputkessa olevan veden synnyttämä painovoima alaspäin kumoaa kapillaari-imuvoiman vaikutuksen.

Kapillaarista kosteuden siirtymistä huokoisessa materiaalissa voidaan kuvata Darcyn lain avulla, jossa kosteuden liikkeen ajavana voimana on huokosalipaine (kaava 2.27). Darcyn

lain mukaisesti kapillaarisen kosteusvirran tiheys määritetään kaavalla 2.30. (Vinha 2011b s.98, Nevander & Elmarsson 2006 s.269)

$$g_{cap} = \frac{k}{\eta_w} \frac{dp}{dx} = k_w \frac{dp}{dx} \quad (2.30)$$

Kaavassa 2.30 g_{cap} on kapillaarisen kosteusvirran tiheys [$\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$], k on materiaalin ominaisläpäisevyys (permeabiliteetti) [kg/m], η_w on veden dynaaminen viskositeetti [Ns/m^2], suhdeluku (dp/dx) on gradientti, joka ilmaisee paine-eron muutoksen huokosalipaineessa ja/tai hydraulisessa paineessa pituusyksikköä kohti virtauksen suunnassa ja k_w on materiaalin kosteudenjohtavuus [$\text{kg}/(\text{mPa})$].

Kapillaarivirtaus voidaan määrittää myös käyttämällä virtauspotentiaalina materiaalin kosteuspitoisuutta (kaava 2.31). Tämä on mahdollista koska kapillaarivirtaus kasvaa, kun materiaalin kosteuspitoisuusero kasvaa. Tällöin kapillaarisen kosteusvirran tiheyden kaava tulee vastaavan tyyppiseksi, kuin diffuusiovirran yhteydessä. (Nevander & Elmarsson 2006 s.270)

$$g_{cap} = -D_{w,s} \frac{dw}{dx} \quad (2.31)$$

Kaavassa 2.31 g_{cap} on kapillaarisen kosteusvirran tiheys [$\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$], $D_{w,s}$ on kapillaarinen kosteusdiffusiviteetti [m^2/s], suhdeluku (dw/dx) on gradientti, joka ilmaisee materiaalin kosteuspitoisuuden muutoksen pituusyksikköä kohti virtauksen suunnassa.

Kapillaarisen kosteusvirran tiheyden määrittämiseksi on myös kehitetty laskentakaavoja, joissa ei tarvita kapillaarisen kosteusdiffusiviteetin tai kosteudenjohtavuuden arvoa. Esitellään seuraavaksi kapillaarisen kosteusvirran tiheyden laskentakaavat veden imeytymiskertoimen (kapillariteettikerroin) A_w [$\text{kg}/(\text{m}^2\text{s}^{0.5})$] ja veden tunkeutumiskertoimen B_w [$\text{m}/\text{s}^{0.5}$] avulla ilmaistuna. (Vinha 2014 s.352-354)

Molemmat kertoimet määritetään kokeellisesti laboratoriotutkimuksilla ja samalla saadaan selville myös materiaalin kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus w_{cap} [kg/m^3]. (Vinha 2014 s.352-354) Koska kaavojen käyttö perustuu kokeellisiin arvoihin, ei niistä voida havaita suoraa yhteyttä edellä esitettyihin teoreettisiin kaavoihin.

Kapillariteettikertoimen avulla kapillaarisen kosteusvirran tiheys voidaan laskea kaavalla 2.32. (Vinha 2011b s.91, Hagentoft 2001 s.101)

$$g_{cap} = \frac{A_w}{2\sqrt{t}} \quad (2.32)$$

Kaavassa 2.32 g_{cap} on kapillaarisen kosteusvirran tiheys [$\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$], A_w on veden imeytymiskerroin (kapillariteettikerroin) [$\text{kg}/(\text{m}^2\text{s}^{0.5})$] ja t on aika [s]

Veden imeytymiskertoimen avulla voidaan laskea myös materiaaliin siirtyneen veden kokonaismäärä kaavalla 2.33. (Vinha 2011b s.92, Hagentoft 2001 s.101)

$$\int_0^t g \, dt = A_w \sqrt{t} \quad (2.33)$$

Kaavassa 2.33 A_w on veden imeytymiskerroin (kapillariteettikerroin) [$\text{kg}/(\text{m}^2\text{s}^{0.5})$] ja t on aika [s]

Veden tunkeutumisvyvyys huokoiseen materiaaliin voidaan määrittää kaavalla 2.34. (Vinha 2011b s.93, Hagentoft 2001 s.101)

$$x_p = B_w \sqrt{t} \quad (2.34)$$

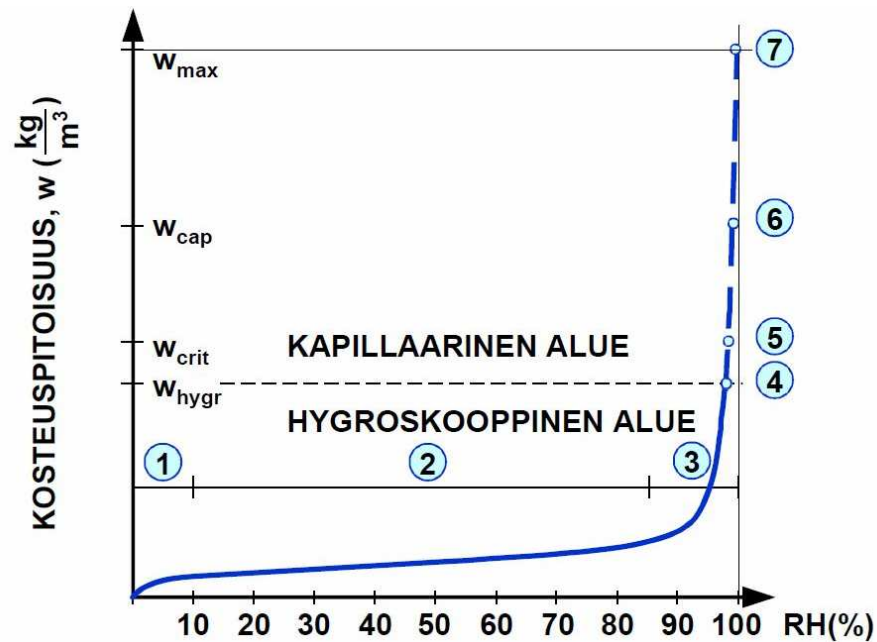
Kaavassa 2.33 B_w on veden tunkeutumiskerroin [$\text{m}/\text{s}^{0.5}$] ja t on aika [s]

Kaikki materiaalin huokokset eivät kuitenkaan pysty täyttymään pelkästään kapillaarisesti, vaan tietyssä vaiheessa saavutetaan materiaalille ominainen kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus w_{cap} [kg/m^3]. Tämän jälkeen materiaaliin ei enää luontaisesti siirry lisää kosteutta ilman ulkoisia voimia, mutta materiaalissa on edelleen kostealla ilmalla täyttyneitä, avoimia huokosia. Huokosiin loukkuun jäänyt ilma alkaa poistua huokosveden läpi diffuusiolla, mutta prosessi on erittäin hidas.

Huokoisen materiaalin koko huokostilavuus voidaan saada vedellä kyllästetyksi pitämällä materiaalikoe-kappale alipaineessa ennen vesiupotusta. Tällöin materiaalihuokosiin muodostunut alipaine imee saatavilla olevan veden huokosiin, kun ympäristön paineolosuhteet palautetaan normaaleiksi. Vesiupotuksessa on syytä jättää yksi pinta juuri ja juuri veden pinnan yläpuolelle, jolloin huokosissa mahdollisesti oleva ilma pääsee poistumaan huokosten täytyessä vedellä. Edellä kuvattua menetelmää kutsutaan vakuumikyllästykseksi.

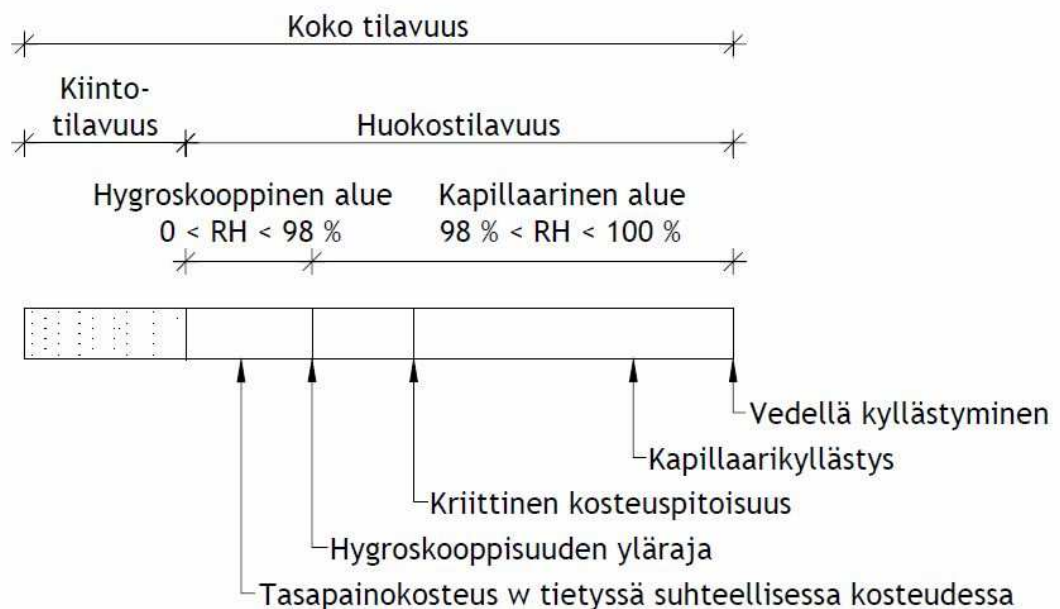
Toinen käytetty menetelmä on keittää materiaalikoe-kappaletta, jolloin materiaalin huokosissa oleva ilma lämpenee ja laajenee. Laajetessaan ilma poistuu materiaalihuokosista ja kun materiaalikoe-kappaleen annetaan jäähtyä keittovedessään, huokosiin muodostuva alipaine imee vettä huokosiin ja tehostaa veden kapillaarista siirtymistä (Hall & Hoff 2002 s.10). Kun materiaalin koko huokostilavuus on täynnä vettä, on saavutettu maksimikosteuspitoisuus w_{max} [kg/m^3].

Kuvassa 2.7 on esitetty kaikki edellä kuvatut vaiheet tasapainokosteuskäyrän avulla ja kuvassa 2.8 esitellyt kosteuspitoisuudet kuvataan suhteessa materiaalin huokostilavuuteen.



Kuva 2.7 Huokoisen materiaalin tasapainokosteuskäyrä (Vinha 2011b s.11)

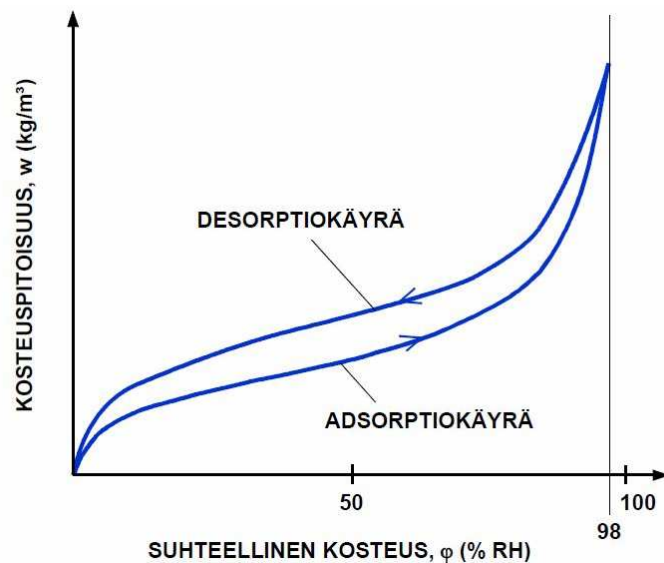
1. Monomolekylaarinen adsorptio, 2. Polymolekylaarinen adsorptio, 3. Kapillaarikondenssi, 4. Hygroskooppinen kyllästyskosteuspitoisuus w_{hygr} ($\sim 98\% RH$), 5. Kriittinen kosteuspitoisuus w_{crit} , 6. kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus w_{cap} , 7. Maksimikosteuspitoisuus w_{max} .



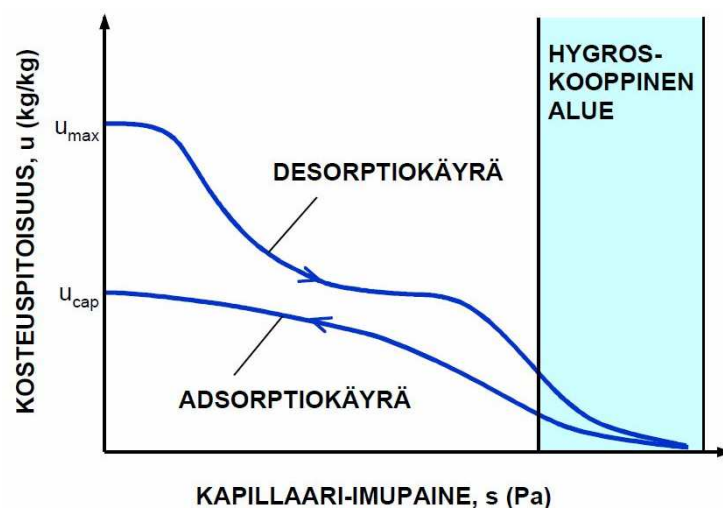
Kuva 2.8 Materiaalin huokostilavuuden kosteussisältö (Björkholz 1997 s.53, Vinha et al. 2005 s.44, Nevander & Elmarsson 2006 s.245).

2.3.4 Huokoisen materiaalin tasapainokosteus ja hystereesi

Huokoisen materiaalin kosteuspitoisuuden ja huokosilman suhteellisen kosteuden välistä yhteyttä kuvataan tasapainokosteuskäyrillä. Materiaalin tasapainokosteuskäyrän muoto riippuu siitä, lähestytäänkö tasapainotilannetta materiaalin kuivuessa (desorptiokäyrä) vai kastuessa (adsorptiokäyrä) (kuvat 2.9 ja 2.10). Desorptiokäyrällä olevat kosteuspitoisuuden arvot ovat yleensä suurempia kuin adsorptiokäyrän arvot samassa suhteellisessa kosteudessa ja käytännössä todellinen tasapainokosteus on jossain näiden käyrien välimaastossa.

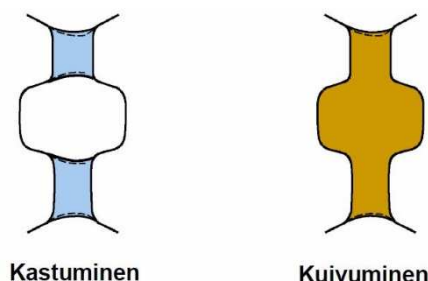


Kuva 2.9 Hygroskooppisen tasapainokosteuskäyrän muoto riippuu siitä, saavutetaanko tasapainotilanne materiaalin kuivuessa (desorptio) vai kastuessa (adsorptio) (Vinha 2011b s.18).



Kuva 2.10 Kapillaarisen tasapainokosteuskäyrän muoto riippuu siitä, saavutetaanko tasapainotilanne materiaalin kuivuessa (desorptio) vai kastuessa (adsorptio) (Vinha 2011b s.29).

Adsorptio- ja desorptiokäyrien välistä eroa kutsutaan hystereesiksi. Ilmiön katsotaan aiheutuvan nk. mustepullo -efektistä (kuva 2.11). Ilmiöstä johtuen huokosverkoston suurempiin huokosiin jää vettä pienten huokosten ”vangiksi” materiaalin kuivuessa. (Vinha 2011b s.15-17, Nevander & Elmarsson 2006 s.250)



Kuva 2.11 Hystereesi-ilmiön osittain selittävä ”mustepullo -efekti” (Vinha 2011b s.17).

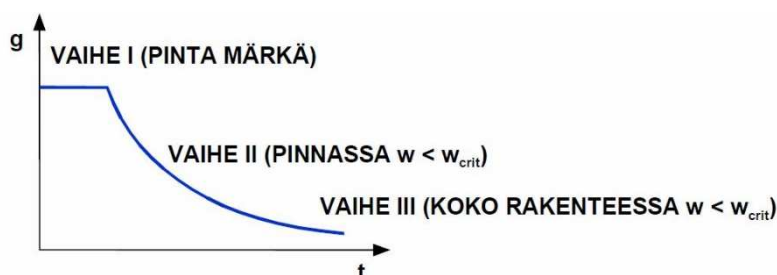
Myös materiaalin lämpötilalla on vaikutusta sorptiokäyrien muotoon, mutta kivimateriaaleissa sen vaikutus on yleensä pieni (Vinha 2011b s.19). Yleisesti lämpötilan nosto alentaa materiaalin tasapainokosteutta ja korkeimmat arvot saadaan 0 °C lämpötilassa, koska tasapainokosteus alkaa laskea myös pakkasen puolelle mentäessä.

2.4 Huokoisen materiaalin kuivuminen

Huokoisen materiaalin kuivumisella tarkoitetaan tässä tutkimuksessa materiaalin kosteuspitoisuuden alenemista tietyistä alkukosteuspitoisuudesta kohti tasapainotilannetta. Joissain materiaaleissa (kuten betoni ja kipsi) osa alkukosteudesta sitoutuu kemiallisesti materiaaliin ja näin ollen rakenteesta poistuvan veden määrä vähenee.

2.4.1 Kuivumisen vaiheet

Huokoisen materiaalin kuivuminen jaotellaan eri lähteistä riippuen kahteen (Björkholtz 1997 s.80), kolmeen (Vinha 2011b s.112-113) tai jopa neljään (Terheiden 2007 s.2) vaiheeseen. Esitellään tässä tutkimuksessa kuivuminen jaoteltuna kolmeen vaiheeseen kuvan 2.12 mukaisesti.



Kuva 2.12 Huokoisen materiaalin kuivumisen vaiheet (Vinha 2011b s.118).

Ensimmäisessä kuivumisen vaiheessa materiaalin pinta on kostea ja kuivumisnopeuden määrää kosteuden haihtumisnopeus materiaalin pinnasta ympäröivään ilmaan. Rakenteen vesihöyrynvastus on huomattavasti pienempi kuin pinnan vesihöyrynvastus ($Z_{v,s} \gg Z_{v,rak}$). Materiaalin kosteuspitoisuus on kauttaaltaan suurempi kuin materiaalin kriittinen kosteuspitoisuus ($w \geq w_{crit}$) ja pintaan siirtyy jatkuvasti kosteutta syvemmältä rakenteesta. Kosteuden siirtymismuotona materiaalissa on lähinnä kapillaarivirtaus. (Vinha 2011b s.112-117, Björkholtz 1997 s.80)

Kuivumisen toinen vaihe alkaa, kun rakenteen pinnassa materiaalin kosteuspitoisuus laskee alle kriittisen kosteuspitoisuuden ja yhtenäinen kapillaarivirtaus syvemmältä rakenteesta pintaan katkeaa ($w < w_{crit}$). Kosteutta siirtyy pintaan edelleen osittaisen kapillaarivirtauksen avulla, mutta kuivumisen edetessä diffuusion ja pintadiffuusion merkitys kasvaa. Rakenteen pintaosissa kosteuspitoisuus on siirtynyt hygroskooppiselle alueelle ja rakenteen vesihöyrynvastus ($Z_{v,str}$) alkaa kasvaa. Materiaalin edelleen kuivuessa hygroskooppisen alueen raja siirtyy jatkuvasti syvemmälle rakenteeseen ja kuivuminen hidastuu. (Vinha 2011b s.113)

Kuivumisen kolmannen vaiheen katsotaan alkavan, kun rakenteen pintaosat saavuttavat hygroskooppisen tasapainokosteuden ympäristön kanssa. Rakenne kuivuu tällöin enää sisäosistaan ja kuivumisnopeus määräytyy pääasiassa sisäosan ja pinnan välisestä vesihöyrynvastuksesta ($Z_{v,str}$). Kosteuden siirtymismuodoista kapillaarinen kosteudensiirto ja pintadiffuusio saattavat loppua jopa kokonaan, jolloin kosteutta siirtyy materiaalista ympäröivään ilmaan vain diffuusiolla. (Vinha 2011b s.113)

2.4.2 Kuivumisen laskennalliset tarkastelut

Kuivumisen ensimmäisen vaiheen aikana kuivumisnopeus pysyy lähes vakiona ja se voidaan määrittää kaavalla 2.35. (Vinha 2011b s.112-117, Björkholtz 1997 s.80)

$$g = \beta_v (\nu_{s,sat} - \nu_a) \quad (2.35)$$

Kaavassa 2.35 g on haihtumisnopeus (kosteusvirran tiheys haihtumisessa) [$\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$], β_v on pinnan kosteudensiirtokerroin [m/s], $\nu_{s,sat}$ on ilman vesihöyryn kyllästyspitoisuus haihduttavassa pinnassa [kg/m^3] ja ν_a on ympäröivän ilman vesihöyrypitoisuus [kg/m^3].

Kaavassa 2.35 tarvittava pinnan kosteudensiirtokerroin voidaan laskea kaavalla 2.36, jota kutsutaan yleisemmin Lewisin yhtälöksi. (Vinha 2011b s.54)

$$\beta_v = \frac{h_{cv}}{\rho_a c_{pa}} \quad (2.36)$$

Kaavassa 2.36 h_{cv} on pinnan konvektiivinen lämmönsiirtokerroin [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$], ρ_a on ilman tiheys (kaava 2.1) [kg/m^3] ja c_{pa} on ilman ominaislämpökapasiteetti vakioaineessa [$\text{J}/(\text{kgK})$]

Pinnan kosteudensiirtokertoimen voidaan käyttää sisäilmassa arvoa $\beta_v \approx 3 \cdot 10^{-3}$ m/s (Vinha 2011b s.117, Björkholtz 1997 s.80) ja ulkoilmassa arvoa $\beta_v \approx 13 \cdot 10^{-3}$ m/s (Vinha 2011b s.117). Jos kuitenkin halutaan laskea tapauskohtaisia arvoja, määritetään tilanteeseen sopiva konvektiivinen lämmönsiirtokerroin seuraavaksi esitettävällä tavalla.

Konvektiivisen lämmönsiirtokertoimen arvoon vaikuttavat pinnan karheus ja geometria, virtauksen luonne (turbulenttinen tai laminaarinen) sekä virtaavan aineen ominaisuudet (Vinha 2011a s.270). Lähteessä (Vinha 2011a s.272) on esitetty useita likimääräisiä kaavoja konvektiivisen lämmönsiirtokertoimen arviointia varten ja tässä tutkimuksesta näistä kaavoista tulevat kyseeseen tilanteet joissa vallitsee pakotettu konvektio pintaa pitkin, kun ilman virtausnopeus on alle 5 m/s (kaava 2.37) sekä luonnollinen konvektio (kaava 2.38).

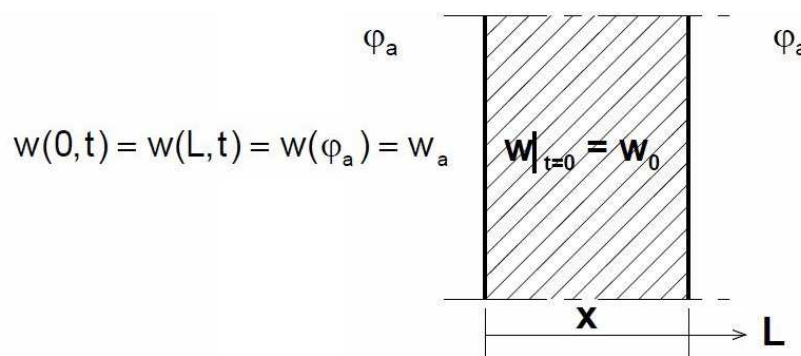
$$h_{cv} = 6 + 4 * r_a \quad r_a \leq 5 \text{ m/s} \quad (2.37)$$

Kaavassa 2.37 r_a on ilmapinnan nopeus pintaa pitkin [m/s]

$$h_{cv} = 2|T_a - T_s|^{0,25} \quad (2.38)$$

Kaavassa 2.38 T_a on ympäröivän ilman lämpötila [K] ja T_s on pinnan lämpötila [K].

Laskennallisissa tarkasteluissa vaiheita 2 ja 3 ei erotella. Kaavalla 2.39 voidaan määrittää materiaalin kosteuspitoisuus eri ajan hetkillä ja eri syvyydellä materiaalissa. On kuitenkin otettava huomioon, että tarkastelussa ympäröivän ilman (ja rakenteen pintojen) suhteellinen kosteus ja lämpötila pysyvät vakioina. Myöskään rakenteen pinnan vesihöyrynvastusta ei ole otettu huomioon. Jos laskennassa halutaan ottaa huomioon muuttuvat olosuhteet, on tarkasteluun käytettävä differentiaalilaskentaa tai tietokonemallintamista. Kuvassa 2.13 on esitetty kaavassa 2.39 käytettyjä merkintöjä.



Kuva 2.13 Kaavassa 2.39 käytetyt merkinnät (Vinha 2011b s.121). Kuvassa ja kaavassa w_a on rakenteen pinnan kosteuspitoisuus ja w_0 on rakenteen sisäosan kosteuspitoisuus.

$$w(x, t) = w_a + (w_0 - w_a) * w'(x, t) \quad (2.39)$$

Kaavan 2.39 termi $w'(x, t)$ määritetään kaavalla 2.40

$$w'(x, t) = \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2n+1} * \sin \left[\frac{(2n+1)\pi x}{L} \right] * e^{-(2n+1)^2 \pi^2 \frac{D_w t}{L^2}} \quad (2.40)$$

Kaavassa 2.40 x on tarkastelupisteen etäisyys rakenteen pinnasta [m], t on ajanhetki kuivumisvaiheen 2 alusta laskettuna [s] ja D_w on materiaalin kosteusdiffusiviteetti [m^2/s].

Huomioitava on, että kaavassa 2.40 kuivumisen oletetaan tapahtuvan kahteen suuntaan. Kosteusdiffusiviteetin D_w arvona on syytä käyttää hygroskooppisen alueen arvoa, vaikka vaiheen 2 alussa kosteuden siirtyminen olisikin osittain kapillaarista.

2.5 Rakenteiden kuivatus

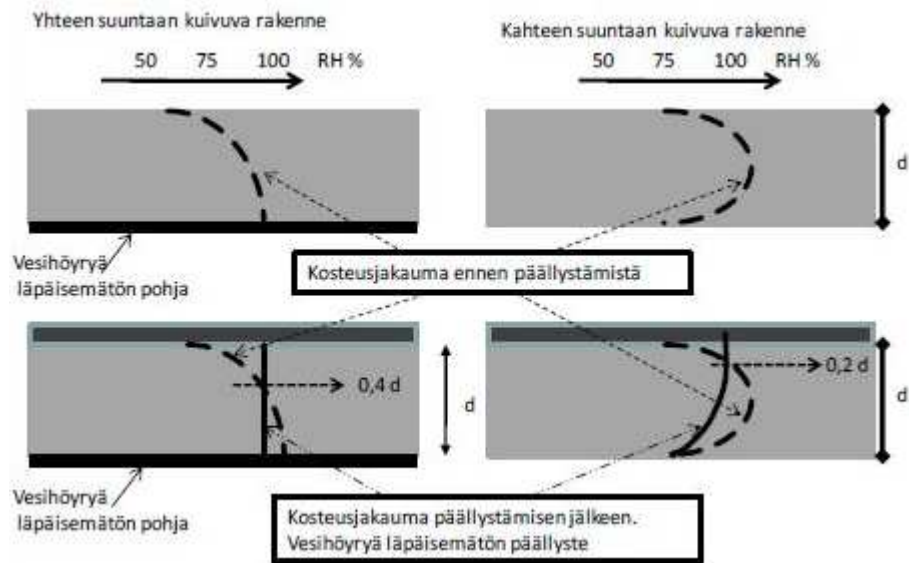
Suomen rakentamismääräyskokoelman osan C2 (1998) kohdassa 1.4.10 määrätään: ”*kosteiden rakenteiden ja rakennuskosteuden on annettava kuivua tai rakenteita on kuivatettava riittävästi, ennen kuin ne peitetään kuivumista hidastavalla ainekerroksella tai pinnoitteella*” (RakMk C2 1998 s.4). Liian kosteana pinnoitetuissa rakenteissa saattaa ilmetä rakenteellisia tai esteettisiä vaurioita ja näiden kosteusvaurioiden seurauksena aiheutuu usein sisäilmaongelmia, jotka jo suoraan vaarantavat ihmisten terveyden.

Rakentamisaikoja pyritään jatkuvasti lyhentämään, jotta rakentamisen aikaiset kustannukset saadaan pidettyä mahdollisimman pieninä ja rakennukset saadaan mahdollisimman nopeasti luovutettua käyttäjille. Tästä huolimatta rakenteiden kuivumiselle on aina varattava riittävästi aikaa tai kuivumisaikoja on tarvittaessa pyrittävä lyhentämään aktiivisella kuivatuksella. Kuivatuksesta aiheutuu kustannuksia, joten kuivatusmenetelmät ja kuivatuksen kesto on määritettävä tarkoituksenmukaiseksi siten, ettei rakennetta kuivateta liikaa, mutta rakenteen toiminnan kannalta oleellinen tavoitekosteuspitoisuus saavutetaan riittävällä varmuudella.

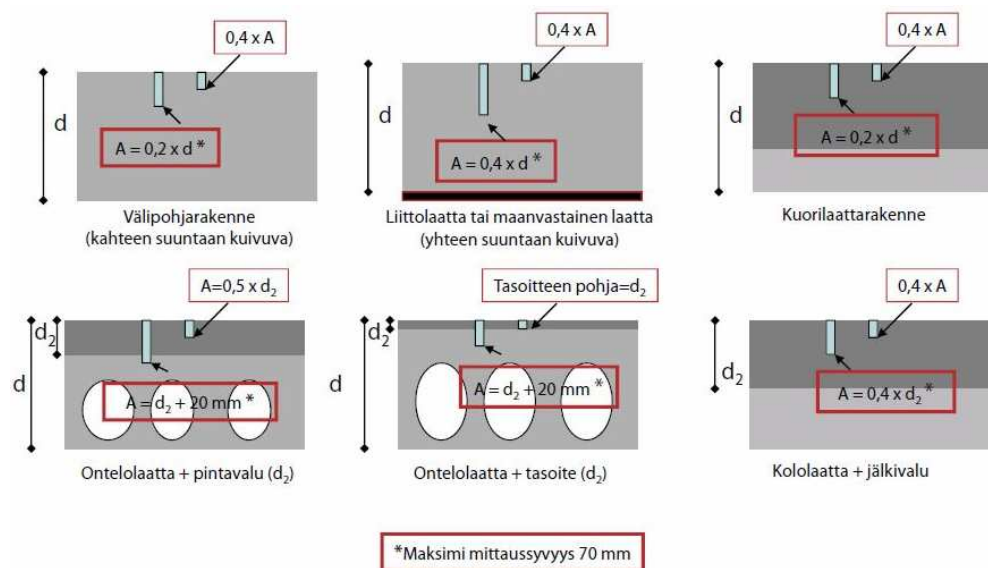
2.5.1 Riittävän kuivumisen arviointi

Tässä tutkimuksessa tutkimuskohteena on lattiarakenne, joten riittävän kuivumisen määritelmää voidaan tarkastella eri lattiapinnoitteille määritettyjen kriittisten suhteellisen kosteuden arvojen perusteella. Pinnoituksen jälkeen lattiarakenteen kosteusjakauma muuttuu merkittävästi (kuva 2.14), koska pinnoite hidastaa kosteuden poistumista rakenteesta.

Tämä ilmiö huomioidaan määrittämällä lattiarakenteiden tavoitekosteuspitoisuus nk. arvostelusyvytydellä (kuva 2.15). Arvostelusyvytydet (mittaussyvytydet) perustuvat oletukseen, että päällystämisen jälkeen suhteellisen kosteuden arvo tiiviin pinnoitteen alla nousee enimmillään siihen arvoon, joka vallitsi rakenteessa ennen päällystämistä yhteen suuntaan kuivuvassa rakenteessa 40% ja kahteen suuntaan kuivuvassa rakenteessa 20% syvytydellä rakenteen paksuudesta. (Merikallio 2009 s.48)



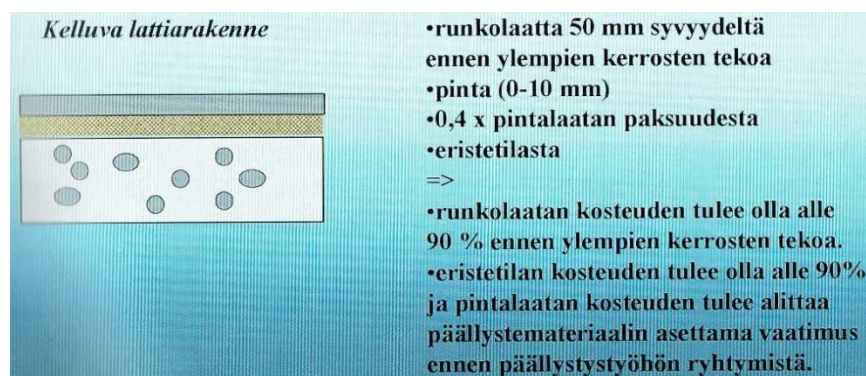
Kuva 2.14 Lattiarakenteen kosteusjakauman muutos vesihöyrytiivin päällystyksen jälkeen yhteen- ja kahteen suuntaan kuivuissa lattiarakenteissa (Merikallio 2009 s.48).



Kuva 2.15 Mittaussyvytydet (A) eri rakennetekniikoilla rakennepaksuuksista riippuen. (RT 14-10984 Betonin suhteellisen kosteuden mittaus s.14).

Kerroksellisessa rakenteessa, kuten kelluvassa lattiarakenteessa, myös runkolaatan on oltava riittävän kuiva ennen välikerroksen asennusta ja pintalaatan valua. Eristetilan suhteellinen kosteus tulee myös mitata ennen pintalaatan päällystämistä ja mahdolliseen kuivatustarpeeseen voidaan varautua ennalta järjestämällä eristetilaan tuuletus.

Kerroksellisten lattiarakenteiden mittauksissa suositellaan mittauspisteen lämpöeristystä suurten mittausvirhemahdollisuuksien ja kondenssiriskin takia. Kuvassa 2.16 on esitetty kelluvan lattiarakenteen riittävän kuivumisen arvioinnin erityispiirteet. Välikerroksen tuuletus on yleistä etenkin väestönsuojan kattorakenteissa, joissa tuuletus voidaan järjestää kevytsorakerrokseen asennettujen salaojaputkien kautta.



Kuva 2.16 Kelluvan lattiarakenteen riittävän kuivumisen arviointi (Merikallio 2016 s.27).

Kriittinen suhteellisen kosteuden arvo (päällystysraja-arvo) määräytyy pinnoitemateriaalin tai kiinnitysliiman kosteudensietokyvyn perusteella (Betonilattiat 2014 s.42). Taulukossa 2.3 on esitetty pinnoitemateriaalikohtaisesti alustabetonin suhteellisen kosteuden enimmäisarvoja päällystyshetkellä. Taulukon arvot ovat alan yleisohjeita ja lattianpäällystystyössä tulee ensisijaisesti noudattaa päällystemateriaalivalmistajan ohjeita, jotta tuotteen takuu pysyy voimassa (Merikallio 2009 s.38)

Taulukko 2.3 Alustabetonin suhteellisen kosteuden [% RH] enimmäisarvot päällystyshetkellä. (perustuu lähteeseen Merikallio 2009 s.37)

Päällystemateriaali	SisäRYL 2013	Betonilattiarakenteiden kosteudenhallinta ja päällystäminen (2007)
Alustaan liimattava lautaparketti (erikoisbetoni v/s < 0.5) ¹⁾	85 (85)	85 (90) ²⁾
Mosaikkiparketti (erikoisbetoni v/s < 0.5) ¹⁾	85 (85)	85 (90) ²⁾
Kelluva lautaparketti ja alusmateriaali ¹⁾	85	85 ²⁾
Laminaatti + vesihöyrytiivis alusmateriaali ¹⁾	85	85 ²⁾
Muovimatot, kumimatot, Linoleumi ¹⁾	85	85 ²⁾
Tekstiilimatot, joissa tiivis alusta ¹⁾	85	85 ²⁾
Luonnonmateriaalista tehdyt tekstiilimatot ¹⁾	85	85 ²⁾
Flokatut matot ja laatat ¹⁾	85	-
Täyssynteettiset tekstiilimatot ilman alusrakennetta ¹⁾	90	90
Muovi-, kumi- ja linoleumlaatat ¹⁾	90	90
Akryyli- ja epoksinnoitteet	97	97
Polyuretaanipinnoitteet	90	90

1) Betonin ja/tai tasoiteen RH (%) pinnassa ja 1...3 cm:n syvyydellä (0.4*A)

2) Julkaisussa Betonirakenteiden päällystämisen ohjeet (2007) on samat arvot

2.5.2 Kuivumisen nopeuttaminen

Kuivumista voidaan pyrkiä nopeuttamaan aktiivisen kuivatuksen keinoin. Aktiivisessa kuivatuksessa pyritään vaikuttamaan joko suoraan kuivatettavaan rakenteeseen tai ympäröiviin olosuhteisiin. Kaavoista 2.35, 2.37 ja 2.38 nähdään, että kuivumisen ensimmäisessä vaiheessa kosteuden poistumista rakenteesta voidaan nopeuttaa rakenteen pinnan lämpötilaa nostamalla sekä ympäröivän ilman kosteuspitoisuutta laskemalla ja virtausnopeutta lisäämällä.

Kuivumisen toisessa ja kolmannessa vaiheessa, kun kosteus siirtyy pääasiassa diffuusiolla, kosteuden poistumisen ajavana voimana on vesihöyryn osapaineiden ero (tai vesihöyrypitoisuuksien ero) materiaalin sisäosien ja pinnan välillä. Näin ollen edelleen rakenteen lämmittäminen ja ympäröivän ilman saattaminen mahdollisimman ”kuivaksi” ovat tehokkaita keinoja nopeuttaa kuivumista. Useiden lähteiden mukaan huonetilassa on kuivumisen kannalta hyvät olosuhteet, kun ilman suhteellinen kosteus on alle 50 % RH ja lämpötila yli 20 °C. Samoin määritellään rakenteen lämpötilan nostaminen tehokkaimmaksi keinoksi nopeuttaa kuivumista, kunhan vain ympäröivä ilma pystyy sitomaan rakenteesta poistuvan kosteuden (RIL 250-2011 s.104, Merikallio 2015 s.37, Betonilattiat 2014 s.46).

Ennen rakenteen lämmittämistä materiaalilla on oltava riittävä lujuus, että se kestää lämpötilanmuutoksista aiheutuvat rasitukset ja lisäksi lämpötilaa on syytä nostaa vaihteittain sisäisten lämpötilaerojen välttämiseksi. Etenkin betonirakenteilla on taipumus halkeilla liian nopeiden lämpötilan muutosten ja kuivumisen seurauksena.

Edellä kuvatuilla keinoilla voidaan vaikuttaa rakennekosteuden poistumisnopeuteen, mutta kokonaiskuivumisaikaan voidaan kuitenkin vaikuttaa tehokkaasti jo rakentamisvaiheessa. Betonissa ja kipsimassassa osa kosteudesta sitoutuu materiaaliin kemiallisesti, joten mahdollisimman pienellä vesi-sementti tai vesi-kipsi suhteella tehtynä alkukosteuspitoisuus jää pienemmäksi ja kuivumisaika lyhenee. Myös materiaalin huokoisuuden lisääminen nopeuttaa kuivumista ja rakenteen kastuminen on luonnollisesti myös estettävä. Rakenteen pinnan hionnalla voidaan avata mahdolliset tukkeutuneet huokokset ja tiiviit pintakerrokset. Myös tilojen siivouksella ja pölyn poistolla on todettu olevan vaikutusta suoraan kuivumisnopeuteen. (Merikallio 2015 s.37)

3. KIPSIN JA KIPSIMASSAN OMINAISUUDET

3.1 Kipsi

Kipsiä esiintyy luonnossa kerrostuneena kipsikivenä eli kidevedellisenä kalsiumsulfaattina ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) sekä kidevedettömänä anhydriittinä (CaSO_4) (Kaasinen *et al.* 1983 s.8). Kipsi on vesiliukoinen mineraali, joten sitä esiintyy pieninä pitoisuuksina myös merivedessä (Knauf). Kipsin liukoisuus 20 °C veteen on 0,2 g ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) / 100 g (H_2O).

Kipsi on haihduntamineraali eli evaporiitti ja sitä esiintyy maanpinnan laakeissa painanteissa, joista merivesi on haihtunut pois. Kipsikerrostumissa esiintyykin aina myös muita evaporiittejä kuten vuorisuoloa. Kipsiä tavataan myös kalkkikivessä sekä joissakin savi-kerrostumissa. (Häkkinen & Kanerva 1981 s.1). Kaivosteollisuuden toimialaraportin (2/2014 s.71) mukaan Suomessa ei tunneta kipsiesiintymiä ja niiden löytymistäkin pidetään epätodennäköisenä.

Luonnon esiintymien lisäksi kipsiä muodostuu suuria määriä myös teollisuuden sivutuotteena monissa erilaisissa prosesseissa. Kipsin muodostuminen liittyy yleensä happojen (esimerkiksi fosfori-, oksaali-, sitruuna-, viini- ja boorihappo) puhdistukseen, valmistukseen tai neutralointiin. Myös savukaasujen ja sulfaattipitoisten jätevesien puhdistuksen yhteydessä muodostuu kipsiä. (Häkkinen & Kanerva 1981 s.1) Suomessa ylivoimaisesti eniten sivutuotekipsiä (1,6 miljoonaa tonnia vuodessa) muodostuu Yara Oy:n Siilinjärven tehtaan fosforihapon valmistusprosessissa (Tuhkarakentamisen käsikirja s.18) (Kuva 3.1). Tuotannon jatkuvuutta ja laajuutta kuvaa hyvin se, että jo yli 30 vuotta sitten Siilinjärven sivutuotekipsiä on pyritty hyödyntämään muun teollisuuden raaka-aineena (Häkkinen & Kanerva 1983 s.3, Kaasinen *et al.* 1983 s.8). Fosforihapon tuotannossa muodostuvaa sivutuotekipsiä kutsutaan fosfokipsiksi (*eng. phosphogypsum*) ja savukaasujen puhdistuksen yhteydessä muodostuvaa sivutuotekipsiä voimalaitoskipsiksi (*eng. flue gas gypsum*) (Sarvaranta & Kaasinen 1994 s.8)



Kuva 3.1 Yara Oy:n Siilinjärven tehtaan läjitysalueella on nykyään 50 miljoonaa tonnia fosforihapon tuotannossa muodostunutta sivutuotekipsiä (Yara Suomi).

3.1.1 Kipsifaasit

Kalsiumsulfaatista tunnetaan kaksi kidevettä sisältävää ja kolme kidevedetöntä faasia, joista osa vielä jaotellaan α - ja β -muotoihin ominaisuuksiensa perusteella (Häkkinen & Kanerva 1980 s.4). Tunnetut kipsin faasit on esitelty taulukossa 3.1.

Taulukko 3.1 Systeemin $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ faasit (perustuu lähteeseen Häkkinen & Kanerva 1980 s.4).

Nimi	Muoto	Molekyyli- paino	Kideveden määrä (%)	Ominais- paino (kg/m^3)	Termody- naaminen stabiilius- alue	Liukoisuus 20 °C veteen (%)
Dihydraatti $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	-	172,17	20,92	2314...2318	< 40 °C	0,2
Hemihydraatti $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$	α	145,15	6,21	2757	Metastabiili	0,67
	β	145,15	6,21	2639		0,88
Anhydryitti III	α	136,14	0	2587	Metastabiili	-
	β	136,14	0	2484		-
Anhydryitti II	-	136,14	0	2985	40...1180 °C	-
Anhydryitti I	-	136,14	-	-	> 1180 °C	-

Kun kipsiä kuumennetaan, osa kipsin kidevedestä saadaan poistumaan ja kipsistä muodostuu hemihydraattia. Kun kuumennus tehdään polttona eli kalsinointina 120...180 °C lämpötilassa kuivissa olosuhteissa on lopputuloksena β -hemihydraattia. Hemihydraatin toista muotoa, α -hemihydraattia saadaan, jos kuumennus tehdään kosteissa olosuhteissa (autoklaavissa) 80...150 °C lämpötilassa. (Häkkinen & Kanerva 1980 s.5, Häkkinen & Kanerva 1981 s.8-10, Siikanen 2009 s.223).

Hemihydraatin α -muoto on tiiviisti kiteytynyttä ja se saavuttaa suuremman lujuuden kuin kiderakenteeltaan suomuinen ja irrallinen β -hemihydraatti. Rakennusteollisuudessa merkittävämpi muoto on β -hemihydraatti, α -hemihydraatin soveltuessa paremmin keraamisen teollisuuden käyttöön ja metallivalimoiden muottikipsiksi. (Häkkinen & Kanerva 1980 s.5)

Kipsin anhydryittifaasien muodostuminen vaatii huomattavasti korkeampia lämpötiloja. Anhydryitti III faasia saadaan, kun hemihydraattia kuumennetaan noin 200 °C lämpötilassa. Hemihydraatin alkuperäinen muoto (α tai β) säilyy kuumennuksessa ja näin ollen myös anhydryitti III esiintyy kahdessa eri muodossa. Rakennustekniikan näkökulmasta anhydryitti III β -muodolla on laastia jäykistäviä vaikutuksia. (Häkkinen & Kanerva 1980 s.6)

Anhydriitti II faasin ominaisuudet muuttuvat kuumennuslämpötilasta riippuen ja sitä voidaan valmistaa suoraan dihydraatista. Kun kipsiä kuumennetaan 300...500 °C lämpötilassa, saadaan nopeasti uudelleenhydratoituvaa ja hitaasti veteen liukenevaa muotoa. Jos kuumennuslämpötila on välillä 500...700 °C, saadaan lähes veteen liukenematonta ja hyvin hitaasti uudelleen hydratoituvaa muotoa, joka on lähes identtistä luonnossa esiintyvän anhydriitin kanssa. Kun lämpötilaa nostetaan yli 700 °C osa kalsiumsulfaattimolekyyleistä voi hajota kalkiksi (CaO) ja rikkiatrioksidiksi (SO₃), jolloin jäljelle jää kalsiumsulfaatin ja kalkin seos, kaasumaisen rikkiatrioksidin poistuessa palokaasujen mukana. Kalsiumsulfaatin viides faasi anhydriitti I esiintyy vain yli 1080 °C lämpötilassa ja sillä ei ole käytännön merkitystä teollisuudelle. (Häkkinen & Kanerva 1980 s.6-7, Sarvaranta & Kaasinen 1994 s.7-8)

3.1.2 Kipsin hydrataatio

Kipsin hydrataatioreaktiossa metastabiili poltettu kipsi ottaa takaisin poltossa poistuneen kideveden ja muuttuu takaisin dihydraatiksi vapauttaen samalla lämpöä, jolloin ilmiö on eksotermien (Häkkinen & Kanerva 1980 s.7, Kaasinen *et al.* 1983 s.9). Kalsiumsulfaatin hemihydraattien ja anhydriittien hydrataatioreaktiot on esitetty kaavamuodossa taulukossa 3.2.

Taulukko 3.2 Kalsiumsulfaatin hydrataatioreaktiot (perustuu lähteeseen Häkkinen & Kanerva 1980 s.7).

Hydrataatioreaktiot ja hydratoitumislämmöt	
α-hemihydraatti	$\alpha\text{-CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O} + \frac{3}{2}\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + 17,163 \text{ kJ/mol}$
β-hemihydraatti	$\beta\text{-CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O} + \frac{3}{2}\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + 19,256 \text{ kJ/mol}$
α-anhydriitti III	$\alpha\text{-CaSO}_4 \text{ III} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + 26,163 \text{ kJ/mol}$
β-anhydriitti III	$\beta\text{-CaSO}_4 \text{ III} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + 30,181 \text{ kJ/mol}$
Anhydriitti II	$\text{CaSO}_4 \text{ II} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + 16,870 \text{ kJ/mol}$

Hydrataatioreaktiossa lähtöaineista ja vedestä alkaa muodostua neulamaisia tai levymäisiä kiteitä, jotka limittyvät keskenään sitoutuen massaksi (G.H.A. van der Heijden *et al.* 2011 s.3, Häkkinen & Kanerva 1980 s.10). Sitoutumista ei saa häiritä mekaanisella liikkeellä eikä massaan saa myöskään lisätä vettä reaktion käynnistyttyä, ettei materiaalin loppulujuus alene.

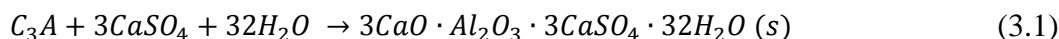
Täydelliseen hydratoitumisreaktioon tarvitaan vettä teoriassa 18,6 % hemihydraatin painosta, mutta työstettävyyden takia massan vesimäärä on käytännössä 60...120 %, joten materiaalista tulee huokoista. (Häkkinen & Kanerva 1980 s.13, Häkkinen & Kanerva 1983 s.6, M.D. Seck *et al.* 2015)

Hydratoitumistapahtuman alussa kipsimassa kutistuu, mikä ei yleensä näy tilavuuden pienemisenä vaan huokostilavuuden kasvuna. Reaktion edetessä limittyneet kipsikiteet kasvavat ja kipsimassa paisuu jonkin verran (~3 ‰), mikä kumoo osaltaan veden haihtumisesta aiheutuvaa kutistumaa. (Häkkinen & Kanerva 1980 s.7-11)

Kipsin sitoutuminen ja kovettuminen on varsin nopeasti etenevä tapahtumaketju. Kipsi sitoutuu nestemäisestä liuoksesta jäykäksi massaksi jo noin 20...40 minuutissa ja se saavuttaa märkäljuutensa maksimiarvon jo muutamassa tunnissa (Häkkinen *et al.* 1985 s.4). Hydrataation etenemiseen ja muodostuvan massan ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa monilla erilaisilla lisäaineilla kuten kiihdyttimillä, hidastimilla, notkistimilla ja huokostimilla (Kaasinen *et al.* 1983 s.75-77, Häkkinen & Kanerva 1980 s.13)

Luonnosta louhittava tai teollisuuden sivutuotteena muodostuva kipsin dihydraatti ei yleensä ole suoraan rakennusteollisuuden hyödynnettävissä. Rakennusteollisuudessa hyödynnetäänkin edellä kuvattua kipsin kykyä dehydratoitua kuumennettaessa ja uudelleen hydratoitua kun kosteutta on saatavilla (Kaasinen *et al.* 1983 s.9).

Rakennusteollisuudessa kipsillä on myös merkittävä rooli portlandsementin lisäaineena, jossa kipsillä säädetään sitoutumisominaisuuksia. Kipsillä ei ole betonissa pelkkiä hyviä vaikutuksia vaan tietyissä olosuhteista kipsi saattaa osaltaan vaikuttaa betonin vaurioitumiseen seuraavasti. Betonissa on luontaisesti trikalsiumaluminaattia (C₃A), joka muodostaa kipsin kanssa ettringiittiä kaavan 3.1 mukaisesti. (Rämö 2010 s.13)



Kipsi ja etenkin kemiallisessa reaktiossa muodostuva ettringiitti turpoaa voimaakkaasti sitoessaan vettä itseensä, joten betoniin aiheutuu sisäisiä jännityksiä, jotka aiheuttavat betoniin mikrohalkeilua ja lopulta rapautumista. Sulfaattirasituksessa betoniin muodostuu kipsiä myös saatavilla olevista lähtöaineista kalsiumhydroksidista (Ca(OH)₂) ja sulfaattioneista (SO₄), joten vaikka sitoutumista voitaisiin säädellä jollain muulla lisäaineella kuin kipsillä, ei ettringiitin muodostumiselta voida kokonaan välttyä. Sulfaatin vaikutuksia betonissa voidaan vähentää käyttämällä masuunikuonasementtiä, jossa on pieni trikalsiumaluminaattipitoisuus. (Rämö 2010 s.13, Mattila 2016 s.16)

3.1.3 Kipsin materiaaliominaisuudet

Luonnossa esiintyvässä kipsikivessä on vähän huokosia ja sen tiheys on noin 2320 kg/m³. Poltetun ja uudelleen hydratoituneen kipsikiven tiheys vaihtelee taas välillä 500...1500 kg/m³. Suuri ero materiaalien tiheydessä johtuu siitä, että valettu kipsi on huomattavasti huokoisempaa kuin luonnon kipsi. Huokoisuuteen vaikuttaa merkittävimmin valmistetun massan vesi-kipsi -suhde, koska hydratoitumisen jälkeen ylimääräinen vesi poistuu materiaalista jättäen jälkeensä avoimen huokosverkoston. (Häkkinen & Kanerva 1980 s.13, Häkkinen & Kanerva 1983 s.6, M.D. Seck *et al.* 2015) Kipsin tiheyksiä ja huokoisuuksia on esitetty taulukossa 3.3.

Kipsiin muodostuvien huokosten koko vaihtelee välillä $10^{-4} \dots 10^{-7}$ m, suurimman osan huokosista ollessa kokoluokkaa $\sim 1 \dots 5 \cdot 10^{-6}$ m (Świrska-Perkowska 2010 s.2, G.H.A. van der Heijden *et al.* 2011 s.4, Häkkinen & Kanerva 1983 s.7).

Kun huomioidaan, että vesihöyrymolekyylin keskimääräinen törmäysväli (*eng. mean free path*) 20 °C lämpötilassa ja normaalissa ilmanpaineessa on noin 100...140 nm eli $1 \dots 1,4 \cdot 10^{-7}$ m voidaan todeta, että kipsin kuivumisen toisessa ja kolmannessa vaiheessa merkittävimmät kosteudensiirtymismuodot ovat vapaa diffuusio ja pintadiffuusio, avustetun diffuusion ja effuusion saadessa pienemmän merkityksen (Świrska-Perkowska 2010 s.2, Andreas 2005 s.24).

Yksinkertaisimmillaan diffuusiolla siirtyvän kosteuden määrä saadaan laskettua luvussa 2.3 esitetyillä kaavoilla, kun tunnetaan rakenteen paksuus d , rakenteen eripuolilla vaikuttavat vesihöyrypitoisuudet v_1 ja v_2 tai vesihöyryn osapaineet p_1 ja p_2 sekä materiaalin vesihöyrynläpäisevyys vesihöyrypitoisuuden δ_v tai vesihöyryn osapaineen δ_p avulla esitetynä. Selvitetään seuraavaksi laskelmissa tarvittavat vesihöyrynläpäisevyyden arvot, jotka ovat kipsiin liittyviä materiaaliominaisuuksia, muiden edellä mainittujen liittyessä rakenteeseen.

3.1.3.1 Kipsin kosteudensiirto-ominaisuudet

Standardin ISO 10456 (2007 s.10) mukaan 23 °C lämpötilassa kuivan ($\varphi < 70$ % RH) kipsin diffuusiovastuskerroin μ_{dry} on 10 ja märän ($\varphi \geq 70$ % RH) kipsin diffuusiovastuskerroin μ_{wet} on 4. Diffuusiovastuskertoimesta voidaan määrittää muunnoskaavan 3.2 avulla materiaalin vesihöyryn läpäisevyys (Radu *et al.* 2012 s.47, Vinha 2014 s.393).

$$\mu = \frac{\delta_{p,a}}{\delta_p} \rightarrow \delta_p = \mu * \delta_{p,a} \quad (3.2)$$

Kaavassa 3.1 μ on diffuusiovastuskerroin, $\delta_{p,a}$ on paikallaan olevan ilman vesihöyryn läpäisevyys ($\delta_{p,a} = 195 \cdot 10^{-12}$ kg/(msPa)) ja δ_p on materiaalin vesihöyryn läpäisevyys vesihöyryn osapaineen avulla ilmaistuna [kg/(msPa)].

Kaavan 3.2 perusteella voidaan laskea standardin mukaisen kipsin vesihöyrynläpäisevyys kuivana ja märkänä vesihöyryn osapaine-eron avulla ilmaistuna.

$$\delta_{p,kipsi,dry} = 10 * 195 * 10^{-12} \frac{kg}{msPa} = 195 * 10^{-11} \frac{kg}{msPa}$$

$$\delta_{p,kipsi,wet} = 4 * 195 * 10^{-12} \frac{kg}{msPa} = 78 * 10^{-11} \frac{kg}{msPa}$$

Koska vesihöyryn osapaine ja vesihöyrypitoisuus ovat toisistaan riippuvat arvot, muun-
noskaavoilla voidaan määrittää vesihöyrynläpäisevyydet kuivalle ja märälle kipsille ve-
sihöyrypitoisuuden avulla ilmaistuna kaavan 3.3 mukaisesti (Vinha 2014 s.393).

$$\delta_v = \delta_p * \frac{R}{M_w} * (273,15 + t) \quad (3.3)$$

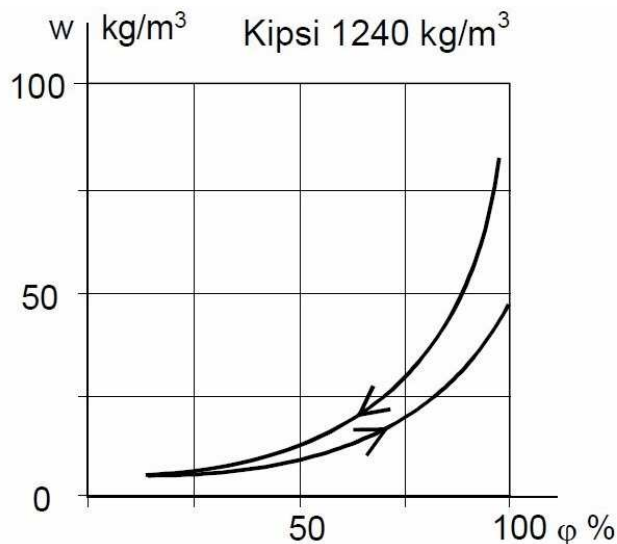
Kaavassa 3.4 δ_v on materiaalin vesihöyryn läpäisevyys vesihöyrypitoisuuden avulla il-
maistuna, δ_p on materiaalin vesihöyryn läpäisevyys vesihöyryn osapaineen avulla ilmais-
tuna, R on yleinen kaasuvakio, M_w on veden moolimassa ja t on ilman lämpötila [°C].

$$\delta_{v,kipsi,dry} = 195 * 10^{-11} * \frac{8314,3}{18,02} * (273,15 + 23) = 2,66 * 10^{-4} \frac{m^2}{s} \quad (3.5)$$

$$\delta_{v,kipsi,wet} = 78 * 10^{-11} * \frac{8314,3}{18,02} * (273,15 + 23) = 1,07 * 10^{-4} \frac{m^2}{s} \quad (3.6)$$

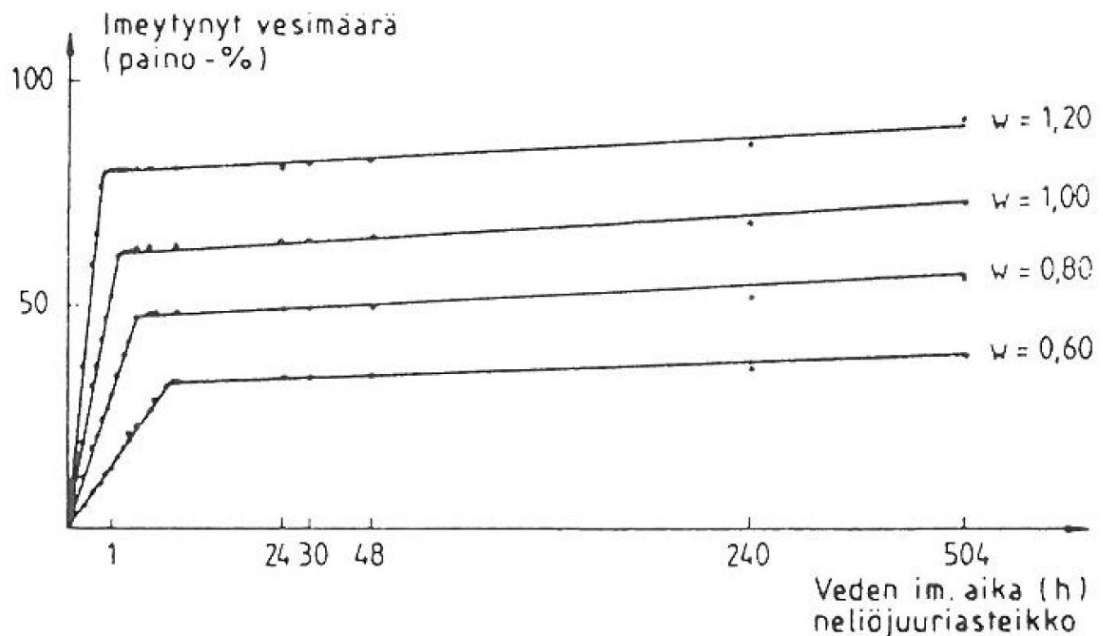
Kuten aiemmin todettiin kappaleessa 2.3, kosteus sitoutuu huokosseinämien pintaan, jo-
ten myös huokosseinämien pinta-ala on yksi tutkittava suure. Lähteen (Häkkinen & Ka-
nerva 1983 s.7) mukaan, elohopeaporoosiometrillä määritettynä kipsin huokosten yhteen-
lasketun ominaispinta-alan A_{pores} on todettu olevan luokkaa $10 \text{ m}^2/\text{g}$.

Hygrooskoopisena materiaalina kipsi pyrkii tasapainotilaan ympäristönsä kanssa ja eten-
kin alhaisemmilla suhteellisen kosteuden arvoilla kosteus siirtyy pääosin diffuusiolla. Ku-
vassa 3.2 on esitetty kipsin tasapainokosteuskäyrä.



Kuva 3.2 Kipsin sorptiokäyrät ja hystereesi (Vinha 2011b s.21, Nevander & Elmarsson 2006 s.481). Ilmoitetun tiheyden perusteella voidaan päätellä vesi-kipsi -suhteen olevan noin $v/k=0,5$.

Huokoinen kipsi on myös kapillaarisesti käyttäytyvä materiaali ja puhtaan kipsimassan on todettu kuivuvan ja kastuvan varsin nopeasti (Häkkinen & Kanerva 1980 s.36). Kuvassa 3.3 on esitetty kipsiin kapillaarisesti imeytyvän veden määrä eri vesi-kipsi -suhteella valmistetuille kipsimassoille. Lähteen (Häkkinen & Kanerva 1983 s.9) mukaan kuvaajien jyrkässä taitekohdassa kapillaarihuokokset ovat täyttyneet vedellä.



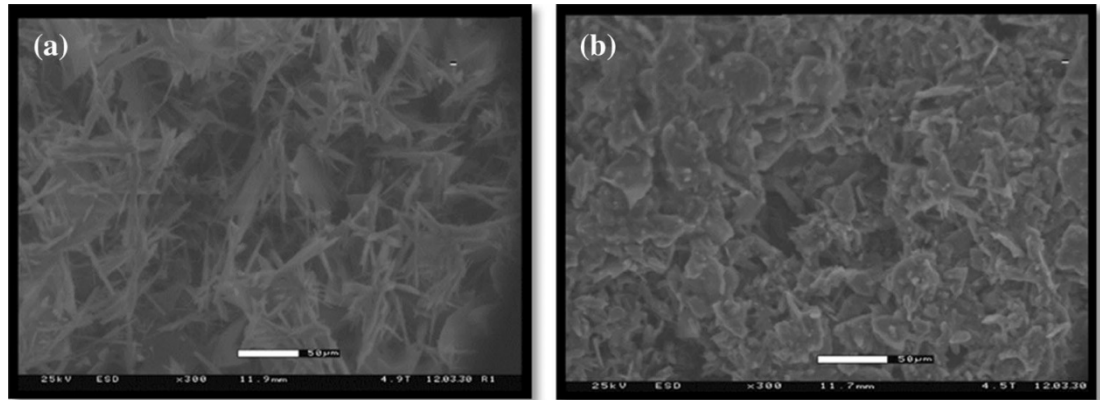
Kuva 3.3 Kipsin kapillaarinen vedenimu ajan funktiona (Häkkinen & Kanerva 1983 s.9).

Nestemäisen veden liikkeisiin kipsissä liittyy vielä eräs mielenkiintoinen ilmiö, jota on syytä tarkastella enemmän. Koska kipsi on vesiliukoista, myös huokosissa oleva nestemäinen vesi on kipsi-ionien kyllästämää. Rakenteen kuivuessa vettä siirtyy kapillaarisesti syvemmältä materiaalista sen pintaan. Pinnasta vesi haihtuu ympäröivään ilmaan, mutta vedessä olleet kipsi-ionit jäävät rakenteen pintaosien huokosiin. Pintaan kertyvä kipsi tukkii pinnan huokosia ja jo kuivumisen ensimmäinen vaihe hidastuu, kun huokosten avoin ja haihduttava pinta-ala pienenee.

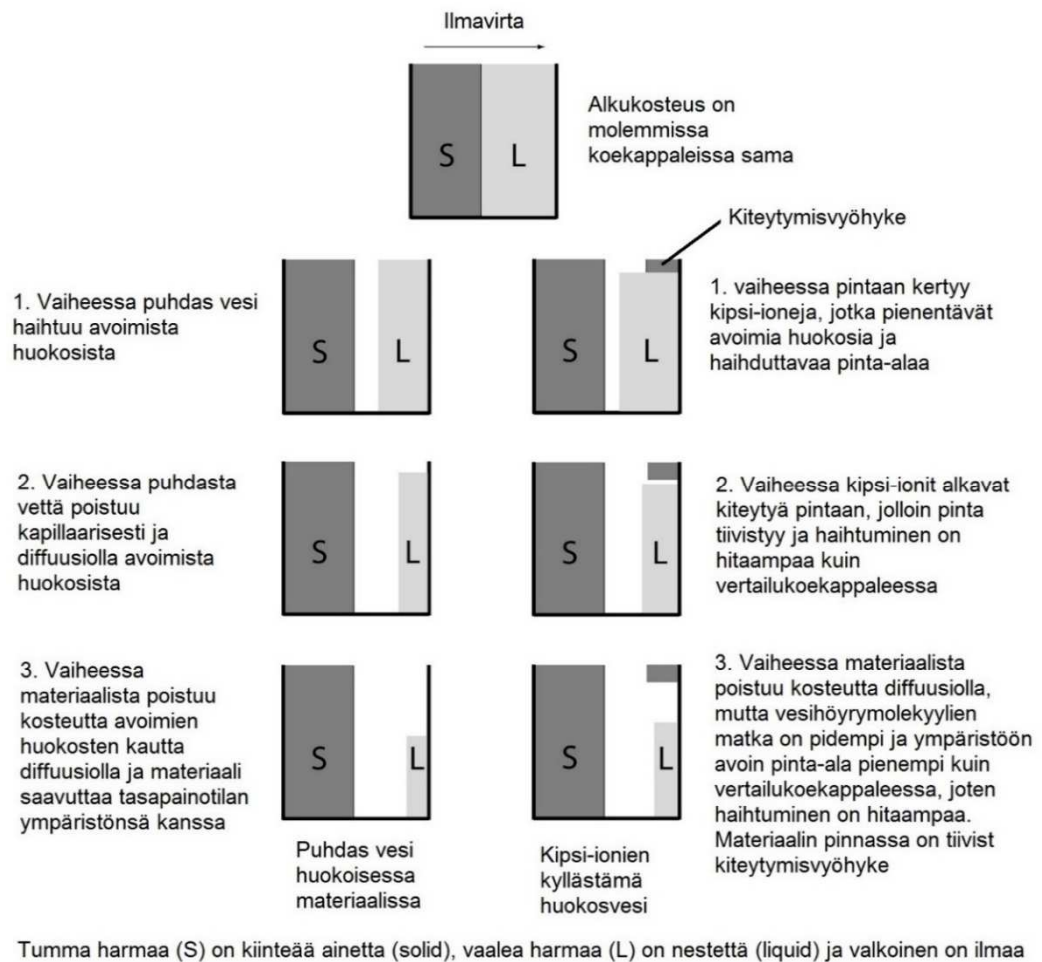
Kuivumisen edetessä pintaan muodostuu kiteytymisvyöhyke (*eng. crystallization region*), kun nestemäinen vesi poistuu ja huokosiin kiteytyy kipsiä. Pinnan tiiviin kiteytymisvyöhykkeen takia vesihöyryn diffuusio sisäosista ympäröivään ilmaan hidastuu. Kiteytymisvyöhykkeen todetaan olevan sitä paksumpi, mitä paksumpi on kuivuva rakennekerros ja mitä kauemmin kapillaarinen vedensiirtyminen jatkuu.

Aiheeseen liittyvässä tutkimuksessa (M.D. Seck *et al.* 2015) suhteellisen pieniä kipsikoekappaleita ($d=54 \text{ mm}/h=12 \text{ mm}$ ja $d=35 \text{ mm}/h=40 \text{ mm}$) kyllästettiin toistuvasti joko tislattulla vedellä tai kipsi-ioneilla kyllästetyllä vedellä ja kuivattiin uudelleen, jolloin ki-

teytyminen havaittiin selkeämmin. Kuvassa 3.4 on elektronimikroskoopilla otettu kuva-pari kiteytymisen vaikutuksista koekappaleen pinnassa neljän kuivatus-kyllästys -kierron jälkeen. Kuvassa 3.5 esitetty periaatteellinen piirros ilmiön kehittymisestä. (M.D. Seck *et al.* 2015)



Kuva 3.4 Kuvassa (a) on avoin pinta ja kuvassa (b) kiteytyminen on tukkinut pinnan huokosia (M.D. Seck *et al.* 2015 s.9).



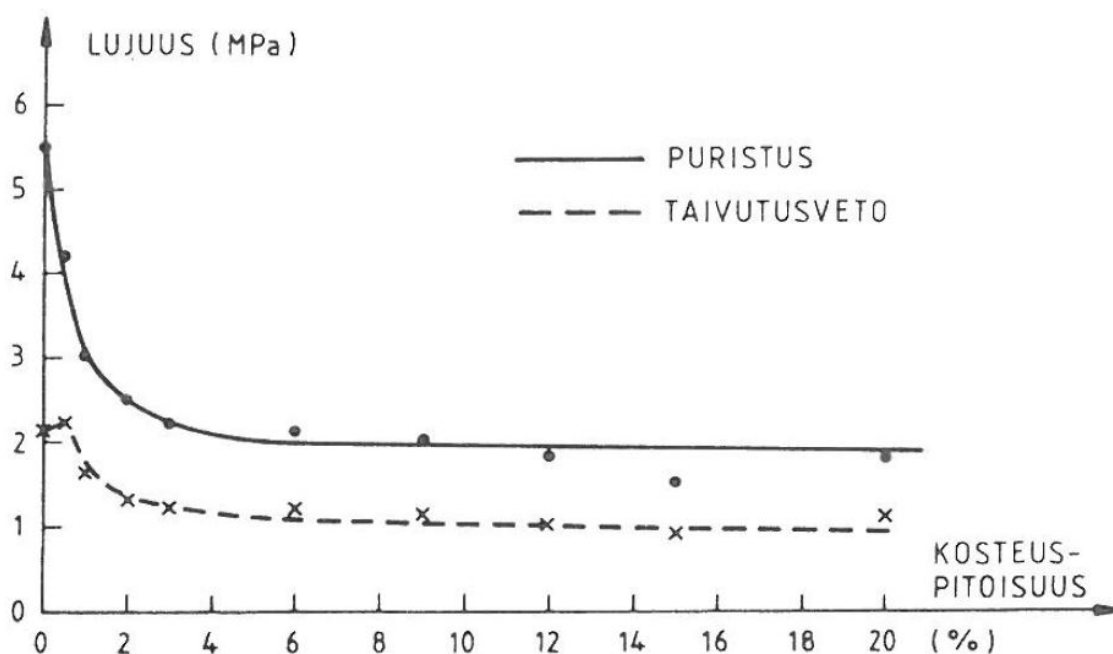
Kuva 3.5 Kiteytymisvyöhyke kipsin pinnassa (Perustuu lähteeseen M.D. Seck *et al.* 2015 s.10).

Kipsin pinnan kiteytyminen ilmiönä on vastaavan tyyppinen, kuin Suomessakin havaittu vesiliukoisten suolojen kertyminen betonirakenteiden suojahuokosiin, jolloin betonirakenteen pakkasenkestävyys heikkenee. Monissa kaupallisissa tuotteissa kiteytymisilmiötä hyödynnetään myös, kun betonin vesitiiviyttä halutaan parantaa tukkimalla huokosia.

3.1.3.2 Kipsin lujuusominaisuudet

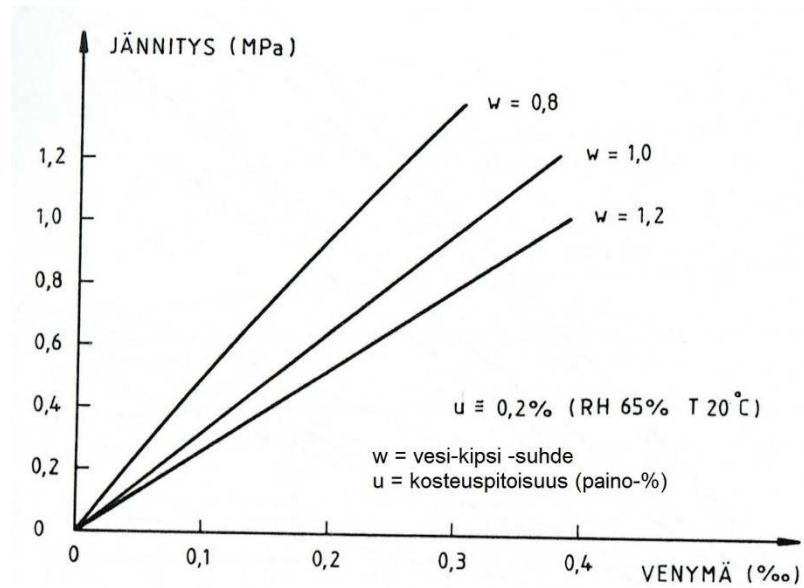
Tutkimuksissa on todettu, että kosteuspitoisuudella on merkittävä vaikutus kipsin lujuusominaisuuksiin. Puristus- ja vetolujuus sekä kimmokerroin pienenevät ja välittömät muodonmuutokset kuormituksessa ja viruman vaikutukset kasvavat merkittävästi kosteuspitoisuuden kasvaessa.

Ilmiötä selitetään adsorptioveden negatiivisella vaikutuksella kipsikiteiden välisiin sidoksiin. Adsorptiolla kiteiden pintaan sitoutunut vesi pienentää kiteiden välistä liukuvastusta ja samalla aiheuttaa materiaalin kiderakenteen turpoamista, jolloin kiteiden väliset sidosvoimat pienenevät. (Häkkinen & Kanerva 1980 s.18-19) Kuvassa 3.6 on esitetty kosteuspitoisuuden vaikutus puristus- ja taivutusvetolujuuteen.

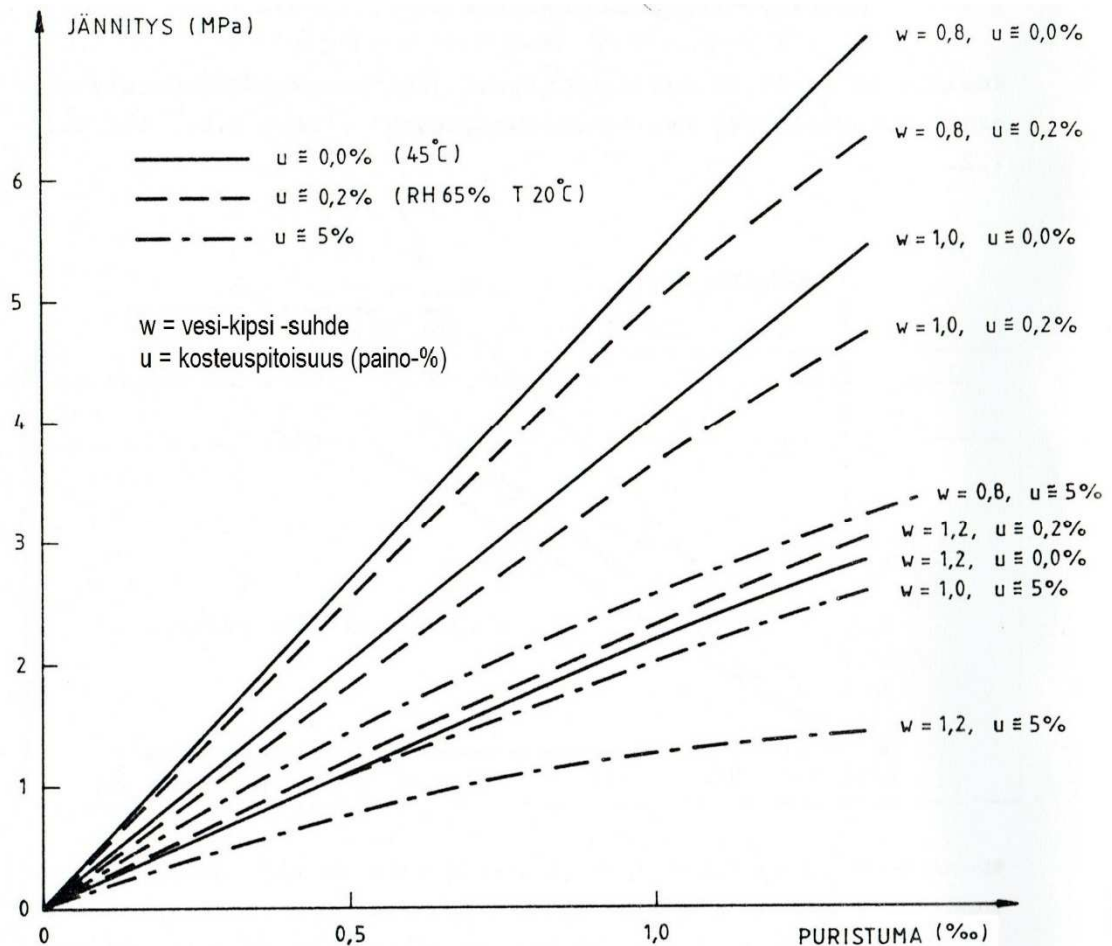


Kuva 3.6 Kosteuspitoisuuden vaikutus kipsin lujuuteen (Häkkinen & Kanerva 1983 s.16).

Kipsi on varsin pehmeä, mutta silti hauras materiaali. Luonnon kipsikiven kovuus Mohsin asteikolla on vain 2 ja valamalla valmistettu kipsi on huokoisuudestaan johtuen vielä pehmeämpää. Kuivan kipsin jännitys-muodonmuutos -kuvaajat (kuvat 3.7 ja 3.8) ovat murttoon saakka lähes lineaarisia. Kipsin murtopuristuma on noin 1,5 % ja murtovenymä noin 0,4 %. (Häkkinen & Kanerva 1983)



Kuva 3.7 Kipsin jännitys-venymä -kuvaaja (Häkkinen & Kanerva 1983 s.21).



Kuva 3.8 Kipsin jännitys-puristuma -kuvaaja (Häkkinen & Kanerva 1983 s.21). Kuvassa on esitetty myös kosteuspitoisuuden vaikutus muodonmuutokseen.

3.1.3.3 Kipsin muita ominaisuuksia

Edellä on tarkasteltu kipsin huokoisuuteen, kosteudensiirtymiseen ja lujuuteen liittyviä ominaisuuksia. Tarkastellaan vielä lyhyesti kipsin muita ominaisuuksia ja esitetään lopuksi kaikki lähdeaineistosta kootut kipsin ominaisuudet taulukossa 3.3.

Kipsi ei ole myrkyllistä eliöille tai ympäristölle, mutta silmiin tai hengitysteihin joutuessaan se aiheuttaa ärsytystä. Kipsin ominaisuudet vaihtelevat raaka-aineen lähteen mukaan ja esimerkiksi kiinalaisen fosfokipsin happamuudeksi ilmoitetaan < 3 pH, kun taas Siilinjärven ja Kuolan niemimaan fosfokipsien kerrotaan olevan kemiallisesti neutraaleja tai lievästi happamia.

Kuten taulukosta 3.3 nähdään, vesi-kipsi -suhde vaikuttaa merkittävästi kipsin ominaisuuksiin ja myös kipsien kiteytymisominaisuudet vaihtelevat raaka-ainelähteen mukaan, joten taulukon arvoja on syytä pitää vain suuruusluokkia kuvaavina arvoina.

Taulukko 3.3 Kipsin ominaisuudet.

Vesi / kipsi -suhde Ominaisuus	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2
Tiheys (kg/m^3) ⁽¹⁾	1390	1180	980	850	740	650	580	520	480	-
Huokoisuus (%) ⁽¹⁾	40	49	58	64	68	72	75	78	79	81
Puristuslujuus (MPa) ⁽¹⁾	33,5	15,4	9,1	5,5	3,9	2,5	1,9	1,2	0,7	0,6
Taivutusvetolujuus (MPa) ⁽¹⁾	4,5	3,8	2,6	2,1	1,3	0,8	0,4	0,1	0	0
Kimmomoduli A ⁽¹⁾	-	-	5440	3910	2470	-	-	-	-	-
Kimmomoduli B ⁽¹⁾	-	-	4220	3570	2450	-	-	-	-	-
Kimmomoduli C ⁽¹⁾	-	-	3710	3160	1820	-	-	-	-	-
Lämmönjohtavuus (W/mK) ⁽²⁾	0,56	0,43	-	0,30	-	-	0,18	-	-	-
Ominaislämpökapasiteetti, c_p (J/kgK) ⁽²⁾	1000									
Diffusiovastuskerron, μ (-) ⁽²⁾	Kuivana 10, märkänä 4									
Vesihöyryn jaksollinen tunkeutumissyvyys $d_{p,v}$, kun $t_p=24\text{h}$ (mm) ⁽³⁾	5									
Happamuus (pH-arvo) ⁽⁴⁾⁽⁵⁾	$< 3 \dots 7$									
Pituuden lämpötilakerroin, α ($1/\text{K}$) ⁽⁵⁾⁽⁶⁾	$9,5 \dots 25 \cdot 10^{-6}$									

1) Häkkinen & Kanerva 1983

2) ISO 10546 (2007) s.10

3) Vinha 2011b s.78

4) Yang et al. 2016 s.1

5) Häkkinen & Kanerva 1980

6) Seppänen et al. 1999 s.77

Kosteusolosuhde A: $u \approx 0,0 \%$, $\theta = 45 \text{ }^\circ\text{C}$

Kosteusolosuhde B: $u \approx 0,2 \%$, $\theta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $\phi = 65 \text{ } \% RH$

Kosteusolosuhde C: $u \approx 5,0 \%$

u = materiaalin kosteuspiitoisuus (paino-%)

3.1.4 Kipsin rakennustekninen käyttö

Kipsin materiaaliominaisuudet rajoittavat osaltaan rakennusteknisiä käyttömahdollisuuksia. Huonosti kosteutta kestäväenä materiaalina kipsi soveltuu käytettäväksi vain kuivissa sisätiloissa, joissa ei esiinny yli 50 °C lämpötiloja. Palosuojamateriaalina kipsi toimii hyvin, koska se luovuttaa kuumentuessaan kidevettä sitoen samalla lämpöä ja näin suojaa muita rakenteita palolta niin kauan kuin kidevettä riittää. (Häkkinen & Kanerva 1983 s.53-57).

Kipsin lujuusominaisuuksiin ja haurauteen voidaan vaikuttaa käyttämällä erilaisia kuituja, pinnoitteita ja runkoaineita. Kuiduista käyttöön soveltuvat lasi- ja selluloosakuidut (lasikuituvahvisteinen kipsilevy, komposiittikipsilevy ja puukipsilevy), mutta raudoitteita kipsissä ei voida käyttää, koska kipsillä ja teräksellä on erisuuret lämpölaajenemiskertoimet, jolloin materiaalien välinen tartunta ei pidä. Lisäksi happamassa kipsissä raudoitteet ruostuisivat muutenkin nopeasti. Pinnoitetuista tuotteista tunnetuin on kipsikartonkilevy, jossa hauraan kipsiytimen molemmilla puolilla on sitkeä kartonkikerros. Kartonki voidaan korvata levyssä myös lasikuituverkolla tai muilla vastaavilla pinnoitteilla. (Taivainen et al. 1982, Siikanen 2009 s.223-229, Vinha 2014 s.286-287)

Kipsimassoissa ja -laasteissa voidaan käyttää monia runkoaineita, kuten hiekkaa, masuunikuonaa, kevytsoraa, vermikuliittia (paisuva savimineraali) tai polystyreeniä. Kipsimasan runkoainetta voidaan jauhaa sopiviksi rakeiksi myös suoraan kipsikivistä tai anhydriitistä. Raskailla runkoaineilla voidaan valmistaa ”kipsibetonia”, jonka tiheydeksi saadaan yli 2000 kg/m³ (Häkkinen & Kanerva 1983 s.30-31). Kipsi ei kuitenkaan muodosta runkoaineen kanssa kemiallisia sidoksia, vaan rakeiden sitoutuminen kipsiin perustuu kipsikiteiden mekaaniseen ankkuroitumiseen. Runkoaineen onkin kuvattu toimivan kipsissä huokosten tavoin ja huokoisuuden on todettu heikentävän lujuutta. (Häkkinen & Kanerva 1980 s.64-65) Kipsilaastit voidaan tehdä pelkästä kipsistä ilman runkoainetta tai kipsiin voidaan sekoittaa hiekkaa, kalkkia, vermikuliittia, perliittiä (vulkanista tuhkaa) tai muita side- ja lisäaineita. Lisä- ja sideaineilla voidaan vaikuttaa myös kipsin happamuuteen. Kipsilaasteilla ei ole taipumusta kutistua vaan ennemmin turvota, joten ne eivät halkeile. (Vinha 2014 s.298, Siikanen 2009 s.108)

Kipsistä on levyjen, massojen ja laastien lisäksi tehty perinteisesti myös erilaisia harkkoja, tiiliä, laattoja ja elementtejä. Helpon muovattavuutensa ansiosta kipsi on soveltunut koristeellisten listojen, ornamenttien ja reliefien valmistukseen.

Kipsin käyttömahdollisuuksia tutkitaan myös maa- ja pohjarakentamisessa, koska kipsillä voisi olla mahdollista stabiloida tai sitouttaa irtonaisia maa-aineksia. Maatalouteen liittyvässä tutkimuksessa (SAVE-hanke) selvitetään parhaillaan muun muassa Siilinjärveltä saatavan sivutuote kipsin kykyä sitoa fosforia pelloille ja hidastaa valuma-alueen eroosiota.

3.2 Kipsipohjainen Knauf LM80 lattiamassa

Tutkimuskohteena oli Knauf Oy:n LM80 lattiamassa, joka soveltuu erityisesti lattialämmityskohteisiin ja ontelolaatta-alustoille. Tuotetta voidaan käyttää myös alusrakenteseen kiinteästi tarttuvana pintavaluna sekä maanvaraisena laattana betonivalun sijasta. Knauf LM80 lattiamassa on valmiiksi sekoitettu kipsipohjainen laasti, johon lisätään vain puhdas vesi. (Knauf LM80 tuotekortti)

Materiaalivalmistajan tuotetietojen ja käyttöturvallisuustiedotteen mukaan laastijauhe sisältää erikoiskipsiä, anhydriittiä, nesteyttimiä, runkoainetta sekä pieniä määriä portlandsementtiklinkkeriä. Runkoaineen kerrotaan koostuvan ainakin rakeiseksi jauhetusta anhydriitistä sekä kvartsihiekkasta raekoon ollessa 0...4 mm. (Knauf LM80 tuotekortti ja käyttöturvallisuustiedote)

3.2.1 Knauf LM80 Lattiamassan valmistus ja käyttö

Kun laastiin sekoitetaan ohjeen mukaisesti 0,15...0,16 kg(vettä)/kg(kuivalaastia), käyttövalmiin lattiamassan koostumus on juoksevaa ja se tasoittuu itsestään. Massan oikea koostumus varmistetaan leviämäkokeella, jossa levyn päälle levinneen massan halkaisija saa olla enintään 42 cm, kun mitta-astia nostetaan levyn pinnalta. Mitta-astian tilavuus on 1,3 litraa ja leviämälustana voi olla esimerkiksi vaakasuoran tason päällä oleva muovikalvo tai muovilevy. Leviämän testaus on esitetty kuvassa 3.9. (Knauf LM80 Tuotekortti)



Kuva 3.9 Knauf LM80 lattiamassan leviämän testaus (Knauf laastimanuaali).

Tuote levitetään yleensä pumppaamalla (kuva 3.10). Levityksen jälkeen massaa tiivistetään lastalla, harjalla tai erityisellä tiivistystyökalulla, jolloin massassa olevat ilmakuplat saadaan poistumaan ja mahdolliset pienet epätasaisuudet häviävät. Valmistajan ilmoittama LM80 lattiamassakerroksen paksuuden tulee olla 20...80 mm suoraan alusrakenteen (ontelolaatta tai vastaava) päälle valettavissa rakenteissa ja 30...80 mm alustastaan irrotetuissa (aluspaperi, askeläänieriste tai vastaava) rakenteissa. Lattialämmityselementtien (putki, kaapeli tai vastaava) päälle massaa on levitettävä 30...80 mm. (Knauf LM 80 Tuotekortti)

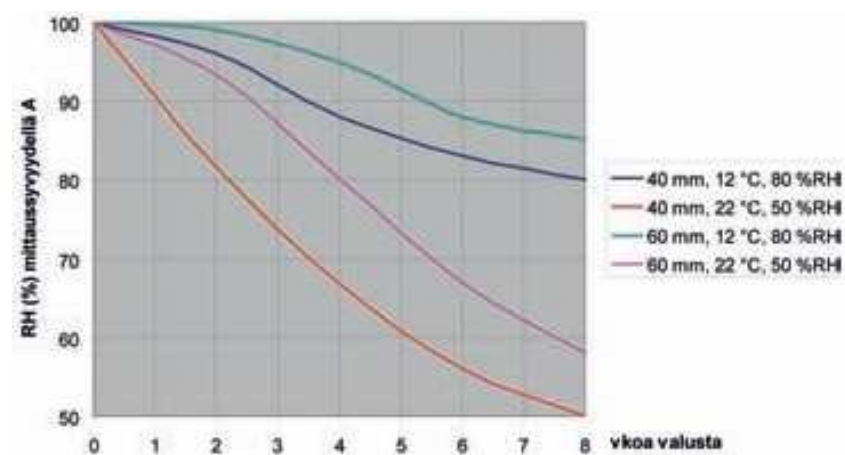


Kuva 3.10 Knauf LM80 lattiamassan pumppaus (Knauf).

Tiivistyksen jälkeen lattia jätetään sitoutumaan ja kuivumaan. Massa sitoutuu kiinteäksi tunnin kuluessa valusta ja se saavuttaa kävelykelpoisuuden noin vuorokaudessa. Kuormituslujuutensa lattiarakenne saavuttaa viimeistään viikon kuluttua valusta.

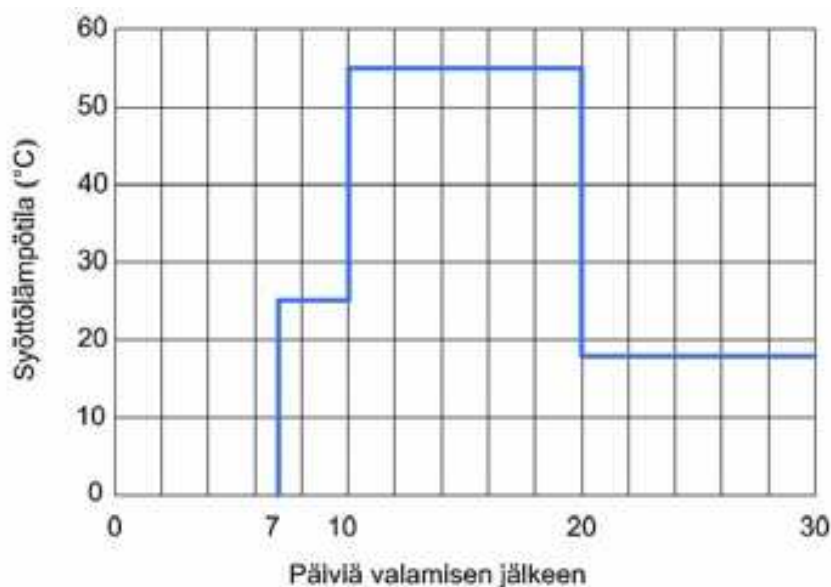
3.2.2 Knauf LM80 Lattiamassan kuivuminen

Valmistajan ohjeen mukaan nopean kuivumisen varmistavat alhainen ilmankosteus, suuri ilman virtausnopeus sekä korkea lämpötila. Kuivumisajan kerrotaan kasvavan progressiivisesti lattian paksuuden kasvaessa, mikä on huomioitu ohjeissa antamalla yli 5 cm paksuille lattiamassakerroksille kuivumisaika-arvioksi 1 cm/1...2 viikkoa, kun tilan lämpötila on 20 °C ja ilman suhteellinen kosteus 65 % RH. Samoissa olosuhteissa alle 5 cm paksujen laastikerrosten kuivumisaika-arvio on noin 1 cm/viikko. Kuvassa 3.11 on esitetty kuivumisnopeuksia kahdelle eri rakennepaksuudelle eri olosuhteissa. (Knauf LM 80 Tuotekortti, työohje ja laastimanuaali)



Kuva 3.11 Knauf LM80 lattiarakenteen kuivuminen (Knauf laastimanuaali).

Kuivumista voidaan nopeuttaa käyttämällä lattialämmitystä rakenteen lämpötilan nostamiseen. Kuvassa 3.12 on esitetty ohjeistus lämpötilansäädöstä kuivauksen nopeutuksessa. Ohjeen mukaan lattialämmitys voidaan kytkeä päälle, kun valusta on kulunut 7 vuorokautta. Ensin lämmitys säädetään 25 °C lämpötilaan ja olosuhteiden annetaan tasaantua 3 vuorokautta. 10 vuorokauden kuluttua valusta lämpötilaa voidaan nostaa 55 °C asti ja rakennetta kuivatetaan tehostetusti 10 vuorokauden ajan. Tämän jälkeen lämpötila laskeaan 18 °C:eseen ja olosuhteiden annetaan jälleen tasaantua. (Knauf lattiaohje LM 80)



Kuva 3.12 Lattialämmityksen säätö Knauf LM80 lattiarakenteen kuivauksessa (Knauf lattiaohje LM80).

Lattiarakenteen tavoitekosteuspitoisuuksien alittuminen luvussa 2.5 esitellyillä arvostelusyvyyksillä varmistetaan kosteusmittauksilla ennen rakenteen pinnoitusta. Kun rakenteen todetaan olevan riittävän kuiva, se voidaan pinnoittaa laminaatilla, parketilla, kivilaatoilla, klinkkerilaatoilla tai vastaavilla pinnoitteilla. Jos lattiapinnoitteeksi asennetaan PVC-, linoleum- tai tekstiilimatto, LM80 valun pintaan on levitettävä hienotasotekerros (0...15 mm). Myös hienotasoitteen on annettava kuivua riittävästi ennen pinnoitusta. Pintalattia on hiottava ja imuroitava huolellisesti ennen alustaan kiinnitettävien tai liimattavien lattiapäällysteiden kiinnittämistä ja tarvittaessa alustaan levitetään vielä pinnoitteen vaatima pohjusteaine ennen pinnoitusta. (Knauf LM 80 Tuotekortti)

3.2.3 Knauf LM80 Lattiamassan tuotetiedot ja materiaaliominaisuudet

Tähän lukuun on koottu Knauf LM80 lattiamassaan liittyvät rakenteelliset ja esimerkiksi työturvallisuuteen liittyvät ominaisuudet. Luvun lopussa on myös esitetty valmistajan ohjeiden mukaiset suositusrakennetyypit, joissa Knauf LM80 lattiamassaa voidaan käyttää. Kuvassa 3.13 on esitetty Knauf LM80 lattiamassan materiaaliominaisuuksia muiden tuotetietojen ohessa.

Tuotetiedot			
Ominaisuus		Arvo	Yksikkö
Työstö	Lattiapaksuus (riippuen alustasta)	20-80	mm
	Raakatiheys Märkä	n. 2200	kg/m ³
	Kuivapaino (valmis lattia)	2000	kg/m ³
	Bulkkipaino (kuiva irtopöytä)	1600	kg/m ³
	Vedentarve per 30 kg kuivajauhetta	4,5-4,8	l
	Tuottoisuus 100 kg kuivalaastia	n. 53	l
	Työstöaika	n. 60	min
	Menekki per 1 cm	n. 18	kg/m ²
	Laastireaktio	alkalinen	
Lujuus	Puristuslujuus	> 30	MPa
	Taivutuslujuus	> 6	MPa
	Kimmomoduli	n. 17000	MPa
Lämpö	Lämmönjohtavuus (λ -arvo)	1,4-1,87	W/m•K
	Lämpölaajenemiskerroin	0,016	mm/m•K
	Kutistuma	n. 0,1	mm/m
Palo	Paloluokka	A1 (palamaton)	
Käyttö	Käveltävyys	noin 24 h	jälkeen
	Kuormitettavuus liitoslattia	n. 3-5 vrk	jälkeen
	Kuormitettavuus uivat lattiat	n. 7 vrk	jälkeen
	Varastointi	6	kk

Kuva 3.13 Knauf LM80 lattiamassan tuotetiedot (Knauf LM80 tuotekortti).

Luvussa 3.1 todettiin, että kosteudella on suuri vaikutus kipsin materiaaliominaisuuksiin. Knauf Oy on teettänyt vuonna 2010 kosteuden vaikutuksiin liittyviä tutkimuksia silloiselle FE80 lattiamassalle, jonka koostumus on valmistajan mukaan sama kuin nykyisen LM80 lattiamassan. Tutkimuksissa on ensin selvitetty FE80 lattiamassan puristuslujuus standardin EN 12390-3 mukaisella puristuslujuuskokeella 28 vuorokauden ikäisistä materiaalikokekappaleista tulokseksi on kokeessa saatu yli 30 MPa. Raportin julkisessa osuudessa ei kerrota olosuhteita, joissa kokekappaleita on säilytetty ennen testausta.

Lisäksi on testattu, kuinka paljon vettä FE80 materiaalikoekappaleet pystyvät sitomaan itseensä vesiupotuksessa. Raportin mukaan kipsimassaan on sitoutunut vesiupotuksessa 4,8 painoprosenttia vettä. Vesiupotuksessa olleista koekappaleista on testattu materiaalin puristuslujuus täysin märkinä, jolloin puristuslujuudeksi on saatu 18 MPa. Vesiupotuksessa olleista koekappaleista on vielä testattu puristuslujuus, kun materiaalin suhteellinen kosteus on kuivumisen seurauksena laskenut alle 80 % RH, jolloin lujuuden todetaan palautuneen alkuperäiseen arvoonsa. (Knauf kipsilaastien ja lattiamassan vedenkesto 14.12.2010)

Kipsin painoprosenttien mukaan ilmoitetun kosteuspitoisuuden ja suhteellisen kosteuden karkeaa yhteyttä kuvataan seuraavasti:

$1,5 p\% \triangleq 95 \% RH$, $0,5 p\% \triangleq 85 \% RH$ ja $0,2 p\% \triangleq 70 \% RH$.

(Knauf laastimanuaali s.15)

Valmistajan mukaan LM80 lattiamassalla valettaviin lattiarakenteisiin ei tarvita raudoitusta, koska materiaalin taiputuslujuus on niin korkea. Materiaalin kutistuma on myös niin pieni (noin 0,1 mm/m), etteivät rakenteeseen muodostuvat vetojännitykset ylitä materiaalin vetolujuutta, joten rakenne ei vaadi myöskään kutistumaraudoitusta.

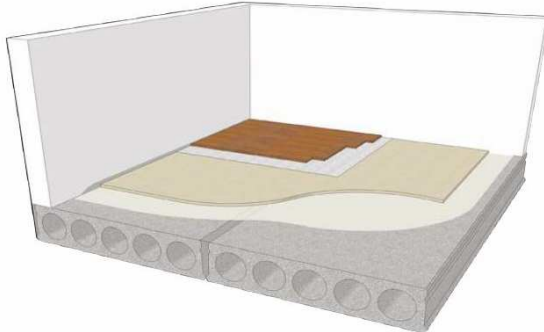
Rakenteeseen saatetaan kuitenkin tarvita liikuntasauvoja lämpöliikkeiden takia sekä rakenteellisten liikuntasauvojen kohdalle. Knauf LM80 kipsimassan pituuden lämpölaajenemiskerroin on $16 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ (vrt. betoni $10 \dots 12 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$). Lämpöliikkeiden vaikutus on syytä huomioida etenkin suurissa lattialämmityksissä laattakentissä, jotka liittyvät ovi-aukkoihin, syvennyksiin tai kapeisiin pintavalu-ulokkeisiin. (Knauf LM 80 Tuotekortti)

Voimassa olevan käyttöturvallisuustiedotteen mukaan Knauf LM80 lattiamassa ei ole myrkyllistä tai muutenkaan ekologisesti vaarallista. Pöly saattaa kuitenkin aiheuttaa ärsytystä silmiin tai hengitysteihin joutuessaan, joten tuotteelle on annettu varoitusmerkintä Xi (ärsyttävä). (Knauf LM80 käyttöturvallisuustiedote) Tuotteesta ei aiheudu myöskään haitallisia päästöjä tai hajoamistuotteita, joten Knauf LM80 lattiamassa on hyväksytty rakennusmateriaalien päästöluokkaan M1. (Knauf M1 kipsilattiamassa LM80)

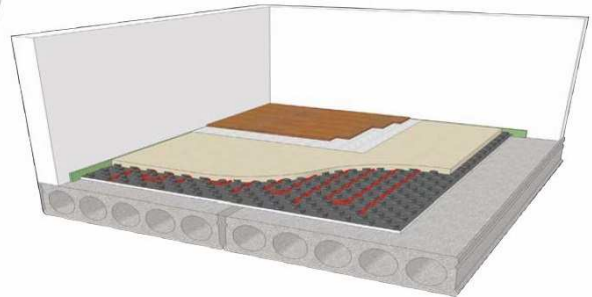
Materiaalivalmistajan lattiaesitteessä on esitelty kuusi esimerkkirakennetyyppiä, joissa on käytetty Knauf LM80 lattiamassaa. Lattiaesitteen mukaiset rakennetyypit on esitetty kuvassa 3.14.

1. Pintalattia ilman lattialämmitystä

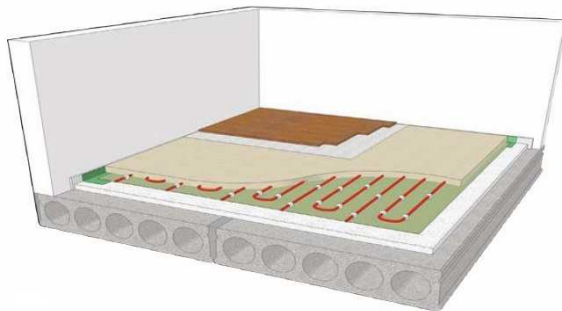
- Knauf LM80 kipsivalu >20mm
- Knauf FE-primer
- Ontelolaatasto

**2. Uiva pintalattia asennuslevyn päällä**

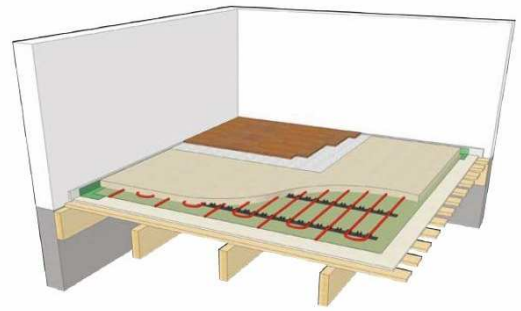
- Knauf LM80 kipsivalu >30mm putken yläpuolelle, jos eristeenä on n. 40mm nystyrälevy (rakenteen kokonaisvahvuus 60mm)
- Lattialämmitysputket
- Askeläänieriste nystyrälevy + reunanauhat
- Ontelolaatasto

**3. Uiva pintalattia eristekerroksen päällä**

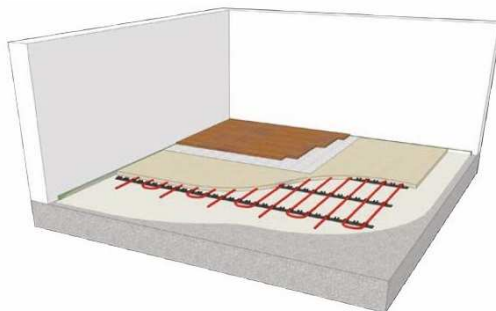
- Knauf LM80 kipsivalu >30mm putken/kaapelin yläpuolelle
- Lattialämmitysputket
- Knauf FE-aluspaperi ja reunanauha
- Askeläänieriste
- Ontelolaatasto

**4. Välipohja**

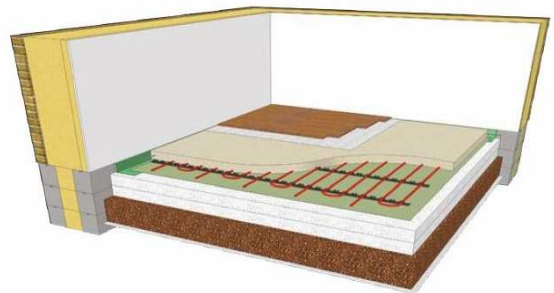
- Knauf LM80 kipsivalu >30mm putken/kaapelin yläpuolelle
- Lattialämmitysputket
- Knauf FE-aluspaperi ja reunanauha
- Rakennuslevy (Esim. lattiakipsilevy KL15)
- Harvalaudoitus 22*100 K200
- Pääkannattajat 50*200 K600

**5. Pintalattia Saneeraus Fast**

- Knauf LM80 kipsivalu >30mm putken/kaapelin yläpuolelle
- Lattialämmitysputket
- Knauf FE-primer
- Betoni

**6. Maanvarainen laatta**

- Knauf LM80 kipsivalu (>40mm putken yläpuolelle)
- Lattialämmitysputket ja asennuskiskot
- Knauf Aluspaperi ja reunanauha
- Eristys ja pohjatyöt rakennesuunnittelijan ohjeiden mukaisesti



Kuva 3.14 Knauf LM80 lattiarakenteita (Perustuu lähteeseen Knauf lattiaesite 2016).

4. RAKENNUSFYSIKAALISET MITTAUKSET

Rakenteen kuivumistutkimuksessa materiaalin kosteuspitoisuuden muutosta on pystyttävä mittaamaan luotettavasti. Kosteuspitoisuuden muutosta huokoisessa materiaalissa pystytään seuraamaan kohdistamalla mittaukset huokosilman suhteelliseen kosteuteen, materiaalin sähköisiin ominaisuuksiin (esimerkiksi resistiivisyys, kapasitanssi tai suhteellinen permittiivisyys), vesihöyryn haihtumisnopeuteen tai materiaalin kosteussisältöön.

Materiaalin sähköisten ominaisuuksien kattava selvittäminen on kuitenkin työlästä, koska materiaaliominaisuudet vaihtelevat usein merkittävästi jopa samojen materiaaalierien sisällä. Haihtumisnopeuden mittaaminen taas antaa viitteitä vain rakenteen pintaosien kosteuspitoisuudesta ja materiaalin kosteussisällön selvittäminen painoprosentteina koetaan hitaaksi ja työlääksi. (Merikallio 2009 s.58-69)

Varmasti ainakin osittain näistä syistä Suomessa ja muissa pohjoismaissa rakenteiden kosteuspitoisuuden muutoksia seurataan mittaamalla huokosilman suhteellista kosteutta. Suomen betoniyhdistyksen (BY) ja betonilattaiyhdistyksen (BLY) ohjeessa BY45/BLY7 Betonilattiat 2014 (2014 s.45) määritetään, että betonin kosteuspitoisuus on mitattava ja ilmoitettava betonin huokosilman suhteellisen kosteuden arvoina. Samoin taulukossa 2.3 esitetyt raja-arvot on annettu huokosilman suhteellisen kosteuden arvoina, joten myös tässä tutkimuksessa mitataan ensisijaisesti huokosilman suhteellista kosteutta.

Luvussa 2 kerrottiin, että ilman suhteellisen kosteuden määrittämiseksi on tunnettava valitseva lämpötila. Lämpötilan perusteella pystytään määrittämään ilman vesihöyryn kylästyspitoisuus tai vesihöyryn kyllästysosapaine. Ilman suhteellinen kosteus pystytään määrittämään kaavalla 2.13, jos ensin pystytään määrittämään ilman vesihöyrypitoisuus tai vesihöyryn osapaine ilmassa.

Seuraavaksi esitellään erilaisten lämpötilan- ja kosteuspitoisuuden mittalaitteiden toimintaperiaatteita yleisellä tasolla.

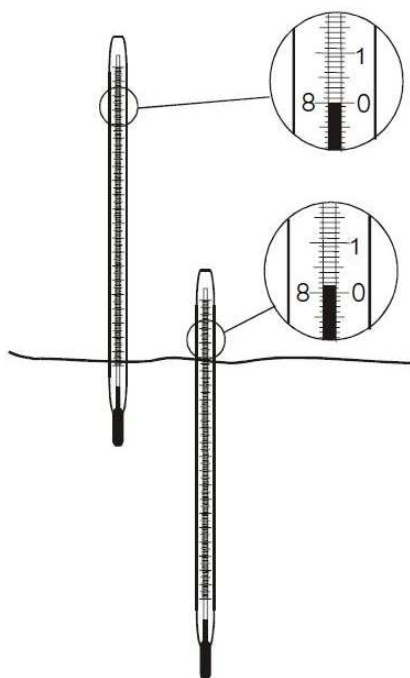
4.1 Lämpötilan mittaus

Materiaalin lämpötilan mittaus voi perustua kosketusmittaukseen (lasi- ja vastuslämpömittarit sekä termoelementit) tai koskettamattomaan infrapunamittaukseen. Kosketusmittauksessa kalibroidun mittalaitteen lämpötila hakeutuu tasapainoon mitattavan materiaalin kanssa. Infrapunamittauksessa mitataan materiaalin pinnan lämpösäteilyä. (Weckström 2005, Vinha 2014 s.333-334)

4.1.1 Lasilämpömittari

Lasilämpömittareissa mittaustarkkuus perustuu lasiputkessa olevan nestepatsaan korkeuden muutokseen nesteen lämpölaajenemisen seurauksena; lasiputken lämpölaajeneminen tulee huomioiduksi kalibroinnissa. Mittalaitteen nesteinä käytetään yleensä elohopeaa, elohopea-tallium -seosta tai spriitä. Nesteen ominaisuudet vaikuttavat soveltuvaan lämpötila-alueeseen välillä $-55 \dots +600$ °C. Mitta-asteikon jakoväli on yleensä $0,01 \dots 2,00$ °C ja lukutarkkuudeksi voidaan saavuttaa optisilla lukulaitteilla jopa jakovälin kymmenesosa.

Mittauksessa upotussyvyys vaikuttaa lasiputken lämpötilaan ja siten myös mittaustarkkuuteen. Mittauksessa tulisi käyttää kalibroinnissa käytettyä upotussyvyyttä tai täysipotusta, jolloin vain muutama milli nestepatsaan yläpäästä jää mitattavan materiaalin ulkopuolelle. Kuvassa 4.1 on esitetty ympäristön vaikutus lasilämpömittarin lukemaan. (Weckström 2005)

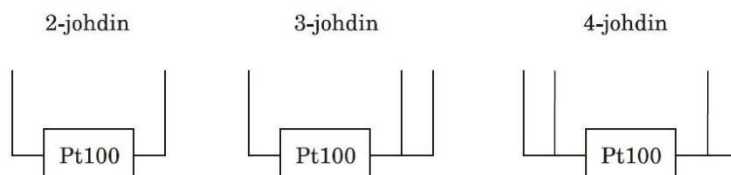


Kuva 4.1 Ympäristön vaikutus lasilämpömittarin lukemaan (Weckström 2005).

4.1.2 Vastuslämpömittari

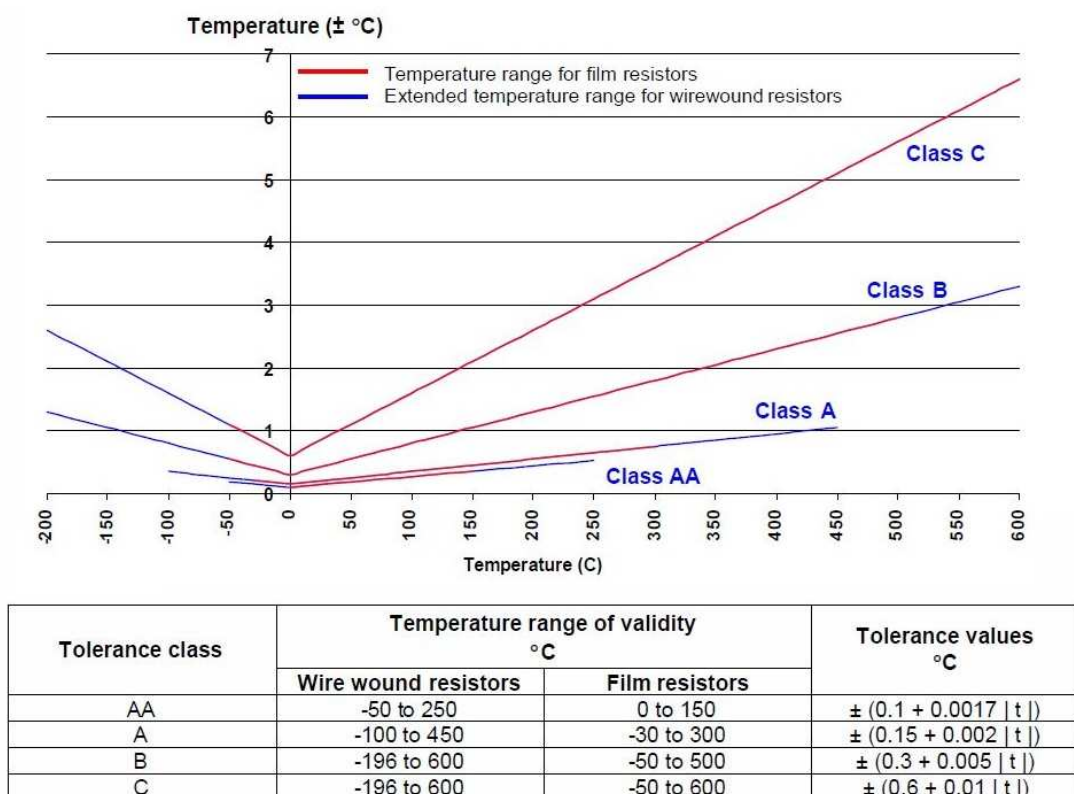
Vastuslämpömittareissa (*eng.* RTD = Resistance Temperature Detectors) mitataan anturimateriaalin lämpötilasta riippuvaa sähköistä vastusarvoa ja anturi voi olla tyypiltään lanka- tai kalvoanturi. Anturimateriaaleina voidaan käyttää metalleja, kuten platinaa, kuparia tai nikkeliä sekä metalliseoksia ja puolijohteita. Yleisimmin teollisuuden mittauksissa käytetään platinasta valmistettuja Pt100 vastusantureita, joiden standardisoitu resistanssiarvo R_0 on 100Ω (ohmia) 0 °C lämpötilassa. Vastaavasti on määritelty myös yleisesti käytetty Pt1000 vastusanturi, jossa standardisoitu resistanssiarvo R_0 on 1000Ω 0 °C lämpötilassa. Pt100 ja Pt1000 antureissa vastusarvo kasvaa lämpötilan kohotessa.

Anturin sähkönvastusta voidaan mitata 2-, 3- tai 4-johdinkytkennoilla. Kytkentätyöistä tärkein on 4-johdinkytkentä, jolloin virta syötetään toisesta johdinparista ja mittaus voidaan tehdä jännitteettömästä johdinparista (kuva 4.2) (Weckström 2005, Vinha 2014 s.333).



Kuva 4.2 Pt 100 anturin vastusmittaus. 2-johdin kytkennässä johtimen vastus vaikuttaa mittaustuloksiin ja -tarkkuuteen. 3-johdin kytkennässä kaikkien johtimien vastusarvojen on oltava yhtä suuret, eli johtimien on oltava saman paksuisia ja pituisia. 4-johdin kytkennässä virta syötetään toisesta johdinparista ja mitataan toisesta (jännitteettömästä) johdinparista. (Weckström 2005).

Pt100 antureilla pystytään mittaamaan lämpötilaa varsin tarkasti ja luotettavasti lämpötila-alueella $-200...+960\text{ °C}$ (Weckström 2005). Kuvassa 4.3 on esitetty erään lämpötila-antureita valmistavan yrityksen ilmoittamat Pt100 antureiden toleranssit, jotka perustuvat Pt100 antureita käsittelevään IEC 60751 standardiin.

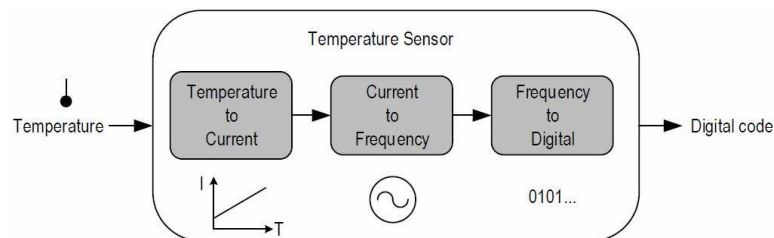


Kuva 4.3 Pt100 lämpötila-anturin mittaustarkkuus (Pentronic AB; http://www.pentronic.se/media/26454/Tolerance_classes_Pt100_IEC60751-2008.pdf; viitattu 15.02.2017).

Vuonna 2009 on julkaistu standardi DIN EN 60751:2009, jossa toleranssiluokiksi ilmoitetaan AA, A, B ja C. Uudessa luokittelussa luokka AA vastaa likipitään vanhan määritelmän mukaista toleranssiluokkaa 1/3 DIN class B. Aiemmassa määrittelytavassa toleranssiluokkina on ollut myös 1/5 DIN class B ja 1/10 DIN class B. Vanhassa määrittelyssä murtolukukertoimella on kerrottu luokan B mukaista ominaistoleranssia $\pm(0,30 + 0,005*|t|)$.

Koska laitteilla mitataan sähkönjohtavuuden vastusarvon muutosta, itse anturin lisäksi mittaustulokseen vaikuttavat mittaajjärjestelmän muut osat, kuten kaapelit ja niiden liitokset sekä näyttölaitteet. Näiden vaikutusta voidaan vähentää, jos koko käytettävä mittaustalaitteisto läpikalibroidaan, jolloin laitteiden vaikutus voidaan huomioida tuloksissa. Mittausvirrasta aiheutuu jonkin verran itselämpenemistä, mikä osaltaan vaikuttaa mittaustuloksiin.

Eräässä tutkimuksen mittalaitteista on käytetty PTAT (*eng.* Proportional To Absolute Temperature) -periaatteella toimivaa lämpötila-anturia, jossa mitattava suure ei välttämättä ole sähkönjohtavuuden vastusarvo. Nimensä mukaisesti menetelmässä mitattava suure on suoraan verrannollinen absoluuttiseen lämpötilaan. PTAT lämpötila-antureissa voidaan mitata jännitteen, resistanssin tai sähkövirran tiheyden muutosta. Anturin toiminnan mainitaan perustuvan bipolaaritransistorien (*eng.* bipolar junction transistor, BJT) tai erilaisten puolijohdetransistorien tai -dioiden lämpötilariippuisten ominaisuuksien mittaamiseen. PTAT antureille on tyypillistä, että ne ovat tarkkoja vain rajatulla lämpötila-alueella. (Chouhan & Halonen 2015 s.1, Chouhan 2015 s.89-100, Kamakshi *et al.* 2016) Kuvassa 5.13 on esitetty kaavio PTAT anturin toiminnasta.



Kuva 4.4 PTAT anturin toimintaperiaate. (Kamakshi *et al.* 2016 s.2) Jos lämpötilan vaikutus sähkövirtaan tunnetaan, voidaan mitattu virta muuntaa taajuudeksi ja taajuudesta edelleen digitaaliseen muotoon.

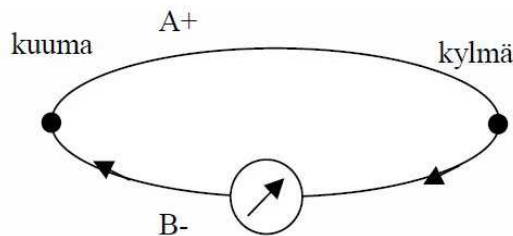
4.1.3 Termoelementit

Termoelementit ovat edullisia ja yksinkertaisia antureita, joiden käyttö on yleistä etenkin korkeissa (yli 500 °C) lämpötiloissa ja ne toimivat jopa yli 1600 °C lämpötiloissa. Termoelementeissä mitataan herkällä mittareilla sähkövirtaa, jonka aikaansaa termosähköinen Seebeck-jännite. Jännite muodostuu, kun kahdesta eri metallista, metalliseoksesta tai muusta sähköä johtavasta materiaalista valmistetaan suljettu virtapiiri eli termopari, jonka liitoskohdat ovat eri lämpötiloissa.

Termoelementit jaotellaan jalometalli- ja perusmetallitermoelementteihin käytettyjen metallien ja metalliseosten perusteella. Termoelementtityyppejä ovat esimerkiksi PtRh-Pt, Cu-CuNi ja Fe-CuNi. Standardissa IEC 584 on esitelty tarkemmin erilaisten termoelementtien valmistusta ja laskentaa.

Termojännitteen suuruus riippuu kahdesta lämpötilasta eli mittauskohteen (kuuma) ja vertailupisteen (kylmä) sekä termoparin materiaaleista. Mittauskohteen (kuuma) lämpötila voidaan määrittää laskennallisesti, kun tunnetaan vertailupisteen (kylmä) lämpötila sekä termojännitteen suuruus.

Mittausepävarmuutta laitteistoon aiheuttaa kylmän pään lämpötilan mittaus sekä virran/jännitteen mittaus. Termojännitteen suuruusluokka on $1 \dots 100 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$. (Weckström 2005, Vinha 2014 s.333-334, Hautala & Peltonen 1999 s.269) Kuvassa 4.5 on esitetty termojännitteen muodostumisen periaatteet.



Kuva 4.5 Termojännitteen syntyminen suljetussa virtapiirissä (termopari). Kuvassa virtapiiriin on kytketty galvanometri (analoginen virtamittari), jonka näyttämä lukema kasvaa liitoskohtien lämpötilaeron kasvaessa. (Weckström 2005).

4.1.4 Infrapunalämpömittarit

Infrapunalämpömittareilla (pyrometereilla) mitataan kappaleen pinnan lämpösäteilyä. Poiketen edellisistä mittalaitetyypeistä, infrapunalämpömittarin ei tarvitse olla kosketuksissa mitattavan kohteen kanssa, joten niillä pystytään mittaamaan kohteen lämpötilaa tarvittaessa hyvinkin kaukaa. Kaupallisissa laitteissa mittausalue on luokkaa $(-50 \dots +3000) ^\circ\text{C}$, joskin mittaustuloksissa voi olla suuriakin virheitä. Mittausvirhettä aiheutuu etenkin emissiokertoimen määrittämisen yhteydessä sekä ulkoisista häiritsevistä säteilylähteistä kuten auringonvalosta.

Pinnan emissiivisyyteen eli emissiokertoimeen vaikuttavat materiaali, lämpötila ja pinnan laatu (karheus, oksidit, kiillotuksen aste jne.). Nämä ominaisuudet saattavat muuttua ajan kuluessa emissiokertoimen saadessa arvoja nollan ja yhden väliltä. Emissiivisyyden määrittämisessä tehty yhden prosentin virhe saattaa aiheuttaa lämpötilan mittauksessa $0,1 \dots 60 ^\circ\text{C}$ virheen, kun koko mittausalue huomioidaan.

Myös lämpökameroiden toiminta perustuu infrapunasäteilyn mittaukseen, mutta niissä käytetään pyrometrien sijasta ilmaisinmatriisia (FPA, Focal Plane Array), jossa yksi ilmaisin vastaa yhtä kuvapistettä. (Weckström 2005, Vinha 2014 s.334)

4.1.5 Muita lämpötilan mittausmenetelmiä

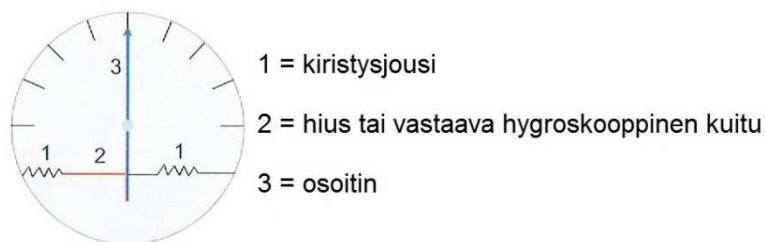
Edellä kuvattujen menetelmien lisäksi lämpötilaa voidaan mitata esimerkiksi painemittareilla, joissa mittaus perustuu nesteen, kaasun tai höyryn lämpölaajenemisesta aiheutuvaan paineen muutokseen. Bi-metalli –lämpömittarien toiminta perustuu kahden eri metallin erisuureen lämpölaajenemiskertoimeen, jolloin yhteenliitetyissä metallinpaloissa tapahtuu ennakoitavissa olevia muodonmuutoksia. Lisäksi tunnetaan akustisia mittausmenetelmiä, joissa mittaus perustuu äänennopeuden muutokseen väliaineessa lämpötilan muutoksen seurauksena. (Vinha 2011b s.211)

4.2 Ilman suhteellisen kosteuden mittaus

Suhteellisen kosteuden mittaus voi perustua hygroskooppisen materiaalin tunnettuihin, kosteuspitoisuudesta riippuviin fysikaalisissa tai sähköisiin ominaisuuksiin. Mittaukset voivat myös perustua esimerkiksi muutoksiin mittauslaitteiston optisessa käyttäytymisessä.

4.2.1 Fysikaalisiin ominaisuuksiin perustuva mittaus

Yksinkertaisimmillaan suhteellisen kosteuden mittalaite voi olla mekaaninen hiuskosteusmittari (Kuva 4.6), jossa hygroskooppisen materiaalin kosteuspitoisuuden muutoksesta aiheutuva pituuden muutos siirretään osoittimella näyttämään suhteellisen kosteuden arvoa. Mekaaninen mittaus tapa on hyvinkin epätarkka eikä tiheällä kalibroinnillaakaan saavuteta merkittävää parannusta. (Vinha 2011b s.212, Vinha 2014 s.340, Hautala & Peltonen 1999 s.233)



Kuva 4.6 Hiuskosteusmittari (Hautala & Peltonen 1999 s.233).

Toinen fysikaalisiin ominaisuuksiin perustuva mittalaite on psykrometri, jossa mitataan veden haihtumisesta aiheutuvaa lämpötilan laskua. Mitattava fysikaalinen suure on siis lämpötila, josta johdannaissuurena saadaan laskettua ilman suhteellisen kosteuden arvo, kun muuttujia vähennetään mittausjärjestelyjen avulla.

Veden haihtuminen sitoo energiaa ominaishöyrystymislämpönsä verran eli noin 2260 kJ/kg. Veden haihtumisnopeus taas riippuu kaavan 2.35 mukaisesti pinnan kosteudensiirtokertoimesta, pinnan vesihöyrypitoisuudesta sekä ympäröivän ilman vesihöyrypitoisuudesta.

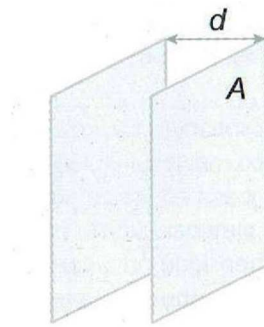
Tähän yhteyteen perustuen ympäröivän ilman vesihöyrypitoisuus voidaan määrittää, kun ensin määritetään haihtuvan kosteuden määrä mittaamalla haihtumisen aiheuttamaa lämpötilan laskua kostealla materiaalilla peitetyllä lämpötila-anturilla.

Ympäröivän ilman lämpötilaa mitataan toisella vastaavalla lämpötila-anturilla, jota ei ole peitetty kostealla materiaalilla. Psykrometrissa kostean anturin pinnan kosteudensiirto-kerroin järjestetään vakioksi tasaisella ilmvirralla, jolloin ainoaksi tuntemattomaksi suureksi jäävä ilman suhteellinen kosteus pystytään määrittämään kaavojen 2.5, 2.12 ja 2.13 avulla. (Vinha 2011b s.212, Hautala & Peltonen 1999 s.233)

4.2.2 Sähköisiin ominaisuuksiin perustuva mittaus

Kapasitiivinen kosteusanturi on peruseriaatteeltaan kondensaattori, johon varastoituu varauksellisia hiukkasia (Kuva 4.6). Kondensaattorin varastoimiskykyä kuvaava suure on kapasitanssi C ja sen yksikkö on faradi [F].

Yksinkertaisimmillaan kondensaattori sisältää kaksi johdinlevyä, joiden välinen etäisyys on d ja pinta-ala A . Jos levyjen välissä on tyhjiö ja levyjen varaukset ovat $+Q$ ja $-Q$, pystytään kondensaattorin kapasitanssin suuruus määrittämään kaavalla 4.1. Kun levyjen väliin lisätään eriste, levyjen välinen sähkökenttä muuttuu ja kapasitanssin suuruuteen vaikuttaa edellä nimettyjen tekijöiden lisäksi myös eristemateriaalin suhteellinen permittiivisyys ϵ_r kaavan 4.2 mukaisesti. Kuvassa 4.7 on esitetty levykondensaattorin periaate sekä kaavoissa 4.1 ja 4.2 käytetyt merkinnät. (Hautala & Peltonen 1999 s.234)



Kuva 4.7 Levykondensaattorin periaate (Hautala & Peltonen 1999 s.260).

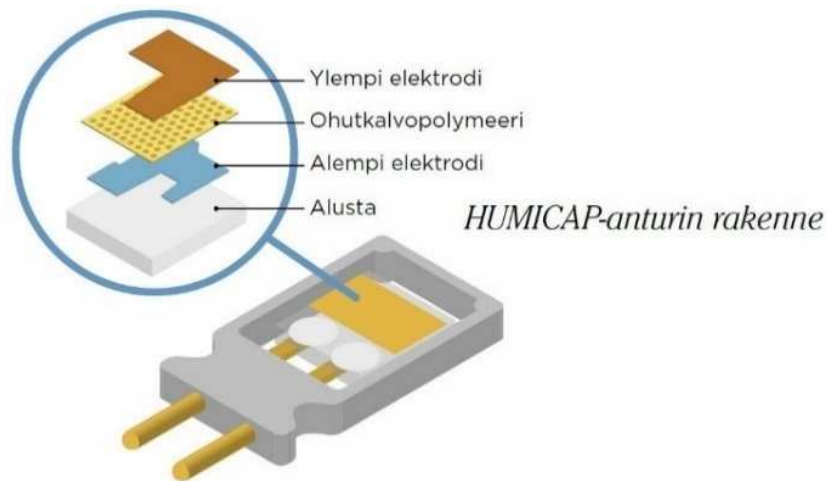
$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (4.1)$$

Kaavassa 4.1 C on kapasitanssi [F], ϵ_0 on tyhjiön permittiivisyys ($\epsilon_0 \approx 8,85419 \cdot 10^{-12}$ F/m), A on johdinlevyn pinta-ala [m^2] ja d on johdinlevyjen välinen etäisyys [m]

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (4.2)$$

Kaavassa 4.1 C on kapasitanssi [F], ϵ_r on materiaalin suhteellinen permittiivisyys [-], ϵ_0 on tyhjiön permittiivisyys ($\epsilon_0 \approx 8,85419 \cdot 10^{-12}$ F/m), A on johdinlevyn pinta-ala [m^2] ja d on johdinlevyjen välinen etäisyys [m]

Kapasitiivisten kosteusanturien (kuva 4.8) toiminta perustuu anturin väliaineena toimivan hygroskooppisen materiaalin (usein polymeeri) sähköisten ominaisuuksien tunnettuihin muutoksiin kosteuspitoisuuden muuttuessa. Kun väliaineeseen sitoutuu hygroskooppisesti kosteutta, materiaalin suhteellinen permittiivisyys muuttuu, mikä havaitaan anturin kapasitanssin muutoksena. Resistiivisissä kosteusantureissa väliaineen sähkönvastusarvo muuttuu vastaavalla tavalla kosteuspitoisuuden muuttuessa. (Vinha 2011b s.212, Vinha 2014 s.340)



Kuva 4.8 Kapasitiivisen kosteusanturin rakenne (Vaisala HUMICAP® -anturi).

4.2.3 Optisiin ominaisuuksiin perustuva mittaus

Kastepiste on yksiselitteinen ja helposti mitattava vesihöyryn ominaisuus. Optisissa kastepisteantureissa anturin lämpötilaa lasketaan esimerkiksi Peltier-elementillä, jolloin anturin pintaan tiivistyy vettä tai muodostuu jäätä. Tiivistymisen tai härmistymisen seurauksena anturin optiset ominaisuudet (valon taittuminen) muuttuu. Ilman suhteellinen kosteus ja kosteuspitoisuus voidaan määrittää, kun tunnetaan ympäröivän ilman lämpötila ja edellä kuvatulla tavalla määritetty kastepistelämpötila. (Vinha 2011b s.212, Vinha 2014 s.340-341)

4.3 Materiaalin kosteuspitoisuuden mittaus

Materiaalin kosteuspitoisuuden määrittämiseen on kehitetty sekä suoria että epäsuoria menetelmiä. Menetelmien selkeimpänä eron on, että ensin mainitulla pyritään suoraan selvittämään materiaalissa olevan kosteuden määrä ja jälkimmäisessä mittaukset kohdistetaan tunnettuihin kosteuden aiheuttamiin muutoksiin.

Suoria menetelmiä käytettäessä rakennetta joudutaan rikkomaan näytteen irrotuksen yhteydessä, mutta tulokset ovat yleensä tarkempia. Joillain epäsuorilla menetelmillä kosteuspitoisuutta pystytään mittaamaan rakenteen pinnasta rakennetta rikkomatta, mutta tällöin mittaustarkkuudessa ei päästä muiden menetelmien tasolle.

4.3.1 Suorat mittausmenetelmät

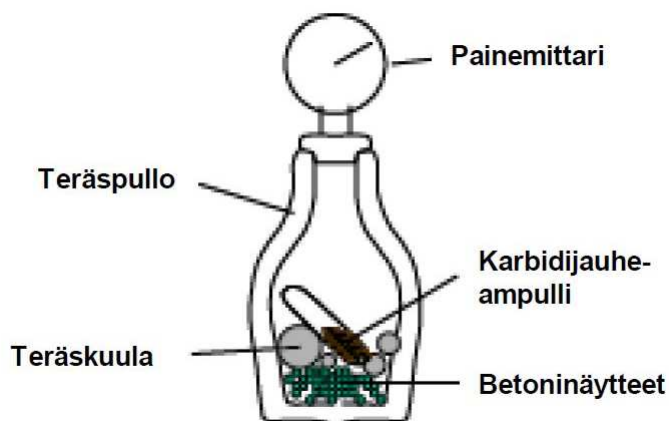
Tarkimmat ja luotettavimmat tulokset saavutetaan punnitus-kuivaus –menetelmällä. Menetelmän virhemahdollisuudet liittyvät lähinnä näytteenottoon, näytteiden säilytykseen ja näytteiden punnitukseen. Materiaalin kosteussisältö saadaan selville, kun materiaalinäytteen alkupainoa verrataan saman näytteen kuivapainoon.

Materiaalinäyte irrotetaan kuivamenetelmällä, esimerkiksi piikkaamalla, ja se pakataan kuljetuksen ja säilytyksen ajaksi haihtumisen estävään pussiin tai astiaan. Näytteet punnitaan mahdollisimman nopeasti irrotuksen jälkeen, jolloin saadaan selville näytteen alkupaino.

Näytteestä poistetaan kaikki haihtumiskykyinen vesi esimerkiksi uunikuivaamalla tai hiilidioksidijään avulla, jonka jälkeen määritetään näytteen kuivapaino. Kun alkupainon ja kuivapainon erotus jaetaan kuivapainolla, saadaan tuloksena materiaalin kosteuspitoisuus painoprosenteina. (Vinha 2011b s.213, Vinha 2014 s.342, Merikallio 2016 s.8)

4.3.2 Epäsuorat mittausmenetelmät

Materiaalinäytteen kosteuspitoisuus voidaan selvittää myös kemiallisesti, jolloin näytteessä oleva vesi reagoi lisättävän kemikaalin kanssa ja kosteussisältö saadaan selville kemikaalin kulutuksen tai reaktiotuotteen määrän perusteella. Esimerkkinä kemiallisesta menetelmästä toimii betonin kosteuspitoisuuden määrittämiseen kehitetty kalsiumkarbidimittari (kuva 4.9).



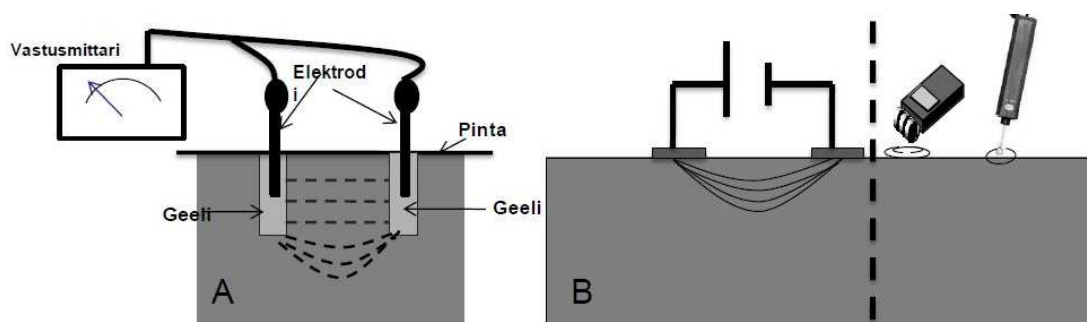
Kuva 4.9 Kalsiumkarbidimittarin havainnekuva (Merikallio 2009 s.64).

Rakenteeltaan kalsiumkarbidimittari on tiivis teräspullo, jossa on painemittari. Teräspulloon laitetaan lasiampullissa oleva kalsiumkarbidijauhe (CaC_2) yhdessä materiaalinäytteen ja teräskuulien kanssa. Suljettua pulloa ravistettaessa teräskuulat rikkovat lasiampullin ja vapautuva kalsiumkarbidi reagoi kiivaasti saatavilla olevan veden kanssa muodostaen asetyleenikaasua. Kaasun muodostumien nostaa painetta pullossa, jolloin laiteval-

mistajan taulukoista voidaan lukea paineen nousua vastaava kosteuspitoisuus. Luotettavien tulosten saavuttamiseksi olisi tunnettava tarkasti tutkittavan betonin koostumus, jonka olisi vastattava myös laitevalmistajan taulukoita. (Vinha 2011b s.213, Merikallio 2016 s.7)

Jos materiaalin sorptiokäyrät eli kosteuspitoisuuden riippuvuus ilman suhteellisesta kosteudesta tunnetaan, voidaan kosteuspitoisuutta arvioida myös porareiästä, mittauspisteestä, pintaan asennettavasta kuvasta tai näytepalasta mitatun suhteellisen kosteuden arvon perusteella. Suhteellisen kosteuden mittaukseen käytetään edellä kuvattuja anturityyppisiä. (Vinha 2011b s.213-214, Hautala & Peltonen 1999 s.235)

Sähköiset menetelmät soveltuvat kosteuspitoisuuden määrittämiseen, jos materiaalin sähköisten ominaisuuksien kosteuspitoisuudesta riippuvat muutokset tunnetaan luotettavasti. Mitattavia suureita voivat olla esimerkiksi kapasitanssi, sähkönjohtavuus tai dielektrisyysvakio. Mittauksia voidaan tehdä rakenteen pinnasta sekä rakenteeseen porattavilla tai painettavilla elektrodeilla sekä pintakosteusmittareilla (kuva 4.10). Sähköiset menetelmät vaativat toimiakseen laajan referenssiaineiston ja ne ovat silti herkkiä erilaisille virhelähteille. (Vinha 2011b s.213-214, Vinha 2014 s.342, Merikallio 2016 s.7-8)



Kuva 4.10 Periaatekuva sähköisestä kosteusmittauksesta. Kuvassa A on esitetty vastusmittaus, missä elektrodit ovat tunnetulla etäisyydellä ja niiden välistä sähkönvastusarvoa mitataan. Kuvassa B on esitetty pintakosteusmittaus. (Merikallio 2009 s.67).

Kuten kapasitiivisen kosteusanturin väliaineessa, myös huokoisessa materiaalissa tapahtuu kosteuspitoisuudesta riippuvia kapasitanssin muutoksia. Roels *et al.* (2004) ovat tutkineet erilaisia kosteuspitoisuuden mittaamenetelmiä. Kyseisessä tutkimuksessa 20 mm * 40 mm kokoiset yhdensuuntaiset levyt (elektrodit) on asetettu 20 mm * 40 mm * 300 mm kokoisen materiaalikoekappaleen päihin. Koekappaleen sivut oli suljettu tiiviisti PVC kutisteletkulla. Näin muodostetussa ”levykondensaattorissa” näytepalan materiaali toimii eristeinä, jonka suhteellinen permittiivisyys vaikuttaa kapasitanssin suuruuteen. Tulosten perusteella muodostetut kuivumiskuvaajat ovat olleet yhdenmuotoisia muiden tutkimuksessa vertailtujen mittaamenetelmien kanssa, kun tutkimuskohteena on ollut kalsiumsilikaattilevy. Kun mittaushetkenä on ollut poltettu savi-tili, kapasitanssikuvaajan muoto on poikennut muiden menetelmien tuloksista enemmän. Tämä viittaa siihen, ettei kapasitanssin mittaaminen ei sovellu kaikkien materiaalien kosteuspitoisuuden määrittämiseen.

Lähteessä (Voss *et al.* 2016) on raportoitu tutkimuksesta, jossa on selvitetty erilaisten betonien permittiivisyyttä ja siten myös kapasitanssin riippuvuutta materiaalin kosteuspitoisuudesta. Kyseisessä tutkimuksessa elektrodit olivat 50 mm * 40 mm kokoisia kuparilevyjä ja niiden perusteella on havaittu selkeitä muutoksia kapasitanssissa kosteuspitoisuuden muuttuessa.

Kosteuspitoisuutta voidaan määrittää myös erikoismenetelmillä kuten röntgenlaitteistolla ja magneettikuvauksella (NMR *Nuclear Magnetic Resonance*) ja MRI *Magnetic Resonance Imaging*). Tutkimukseen on kehitetty myös gamma-, neutroni- ja betasäteilyn intensiteetin ja materiaalin kosteuspitoisuuden väliseen riippuvuuteen perustuvia menetelmiä. (Vinha 2011b s214, Roels *et al.* 2004, Voss *et al.* 2016, Hall & Hoff s.15 ja 31-39)

Kipsin sisältämän kideveden vaikutus neutronien etenemiseen on todettu tutkimusten perusteella merkittäväksi. Lähteen (Hall & Hoff 2002 s.32) mukaan neutronit pysähtyvät kipsissä jo 3,83 mm syvyydessä, kun esimerkiksi kvartsikivessä neutronien todetaan etenevän 2500 mm syvyydelle. Röntgen- ja gammasäteilyn taas todetaan etenevän kipsissä 60...70 mm syvyydelle säteilytehosta riippuen, mikä taas on hieman enemmän kuin kvartsin vastaava ominaisuus (Hall & Hoff 2002 s.15).

4.4 Materiaalin huokosilman suhteellisen kosteuden mittausmenetelmät

Edellä on kerrottu tutkimukseen liittyvien rakennusfysikaalisten mittalaitteiden toiminta-periaatteista. Käsitellään tässä yhteydessä vielä käytännön mittausmenetelmät, joissa näiden periaatteiden mukaisesti toimivia mittalaitteita hyödynnetään.

Suomessa kiviaineisten rakennusmateriaalien kosteuspitoisuutta arvioidaan yleisesti huokosilman suhteellisen kosteuden perusteella (Betonilattiat 2014, SisäRYL2013, RT 14-10984, Merikallio 2009), joten myös tässä työssä keskitytään pääasiassa huokosilman suhteellisen kosteuden mittaukseen. Ohjekortin RT 14-10984 mukaan tarkkoja huokosilman suhteellisen kosteuden mittausmenetelmiä ovat porareikämittaus sekä näytepalamittaus (Kuva 4.11).

Suuntaa antaviksi mittausmenetelmiksi mainitaan pintakosteusilmaisimien käyttö, mittaus putkittamattomasta porareiästä, porareikämittaus toistuvasti samasta reiästä, mittaus valuun asennettavasta mittausputkesta, mittaus pian poraamisen jälkeen, mittaaminen jatkuvasti betonin sisällä olevalla anturilla, porareikämittaus suosituslämpötila-alueen (+15...+25 °C) ulkopuolella, näytepalamittaus asentamatta mittapäätä välittömästi mittausputkeen sekä näytepalamittaus normaalia pienemmällä näytemäärällä tai epätarkalla syvyydellä.

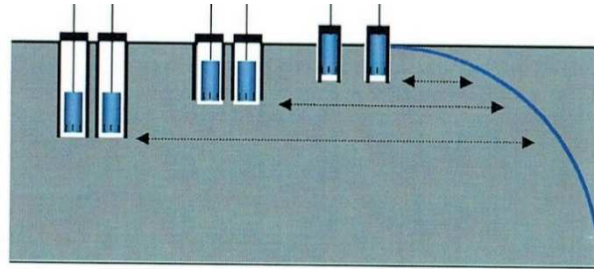


Kuva 4.11 Betonirakenteen suhteellisen kosteuden mittaus poreikämenetelmällä sekä näytepalamenetelmällä. Kuvasta havaitaan, että molemmilla menetelmillä saavutetaan samat mittaustulokset. (RT 14-10984 s.1).

Mittausputkesta määritetty huokosilman suhteellinen kosteus on paikallinen arvo tietyltä mittaussyvyydeltä. Rakenteen laajempi tarkastelu edellyttää, että mittauksia tehdään useammassa mittauspisteessä ja monelta eri syvyydeltä.

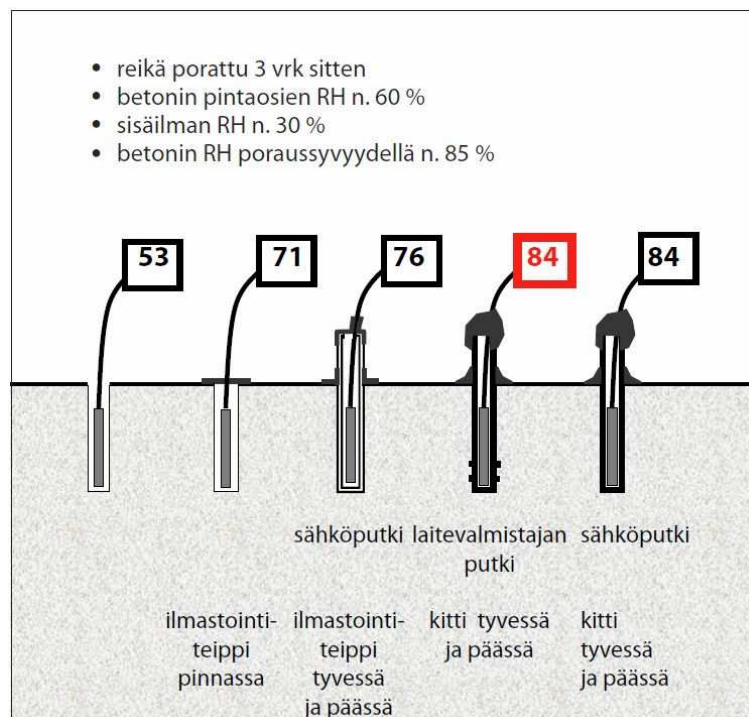
Rakenteiden kosteusmittauksissa mittauspisteiden sijainnit ja lukumäärä määritetään tapauskohtaisesti. Yleisohjeena pidetään, että mittaukset tehdään kerroksittain vähintään kahdesta huoneistosta ja kahdesta kylpyhuoneesta. Pitkissä rakennuksissa mittaukset suositellaan tehtäväksi rakennuksen päissä ja keskellä. Mittauspisteiden sijainnin määrittämisessä huomioidaan myös erilaiset rakennetyypit, materiaalit, rakentamisajankohta sekä rakenteiden erilaiset kuivumisolosuhteet. (Merikallio 2016 s.21)

Jokaiseen mittauspisteeseen on tehtävä vähintään 2 saman syvyyistä rinnakkaista reikää, joiden välinen etäisyys on enintään 300 mm. Lisäksi jokaiseen mittauspisteeseen tehdään reikiä useammalle syvyydelle, jolloin rakenteen kosteusjakauma pystytään määrittämään. Arvostelussyvyyden lisäksi suositellaan pintaosien suhteellisen kosteuden määrittystä koepalamittauksella 0...10 mm syvyydeltä ja porareikämittauksella 20...30 mm syvyydeltä. (Merikallio 2016 s.22) Kuvassa 4.12 on esitetty kosteusjakauman määrittäminen porareikämitausten perusteella.



Kuva 4.12 Rakenteen kosteusjakauman määrittäminen porareikämittauksen perusteella (Merikallio 2016 s.22).

Vaikka ohjekortissa useita menetelmiä on mainittu vain suuntaa antaviksi, huolellisella ja suunnitelmallisella tutkimustyöllä sekä erikseen kehitetyillä mittalaitteilla pystytään saavuttamaan luotettavia mittaustuloksia myös silloin, kun perinteisiin menetelmiin muodostuu virhettä. Esimerkiksi lähteessä (Merikallio 2016 s.21) on kerrottu betonirakenteen pitkäaikaisesta kosteus seurannasta, jossa vaihtoehtoina ovat mittaus valuu asennettavasta mittausputkesta sekä mittaaminen jatkuvasti betonin sisällä olevalla anturilla. Mittausputket voidaan tällöin asentaa muottiin ennen valua tai ne voidaan asentaa porattuun reikään tai sahattuun roiloon tai esimerkiksi kelluvan lattian eristetilaan. Mittaus voi olla jatkuvaa tai se voidaan toteuttaa määräajoin, jolloin putkien on oltava ehdottoman tiiviitä myös mittausten välillä. Tiivistyksen vaikutusta porareikämittauksen mittaustuloksiin on esitetty kuvassa 4.13.



Kuva 4.13 Esimerkkejä erilaisten tiivistystapojen vaikutuksesta mittaustuloksiin. Kuvassa esitetyssä tilanteessa kosteuskapasiteetiltaan pieni mittapää on tasaantunut yhden tunnin ajan mittausräissä. Tuloksista havaitaan, että kitillä tai massalla tiivistetystä sähköputkesta mittaamalla saavutetaan samoja tuloksia kuin laitevalmistajan putkesta, jossa on tiivistykset myös lähellä reiän pohjaa. (RT 14-10984 s.11).

5. TUTKIMUKSESSA KÄYTETYT MITTAUSMENETELMÄT JA MITTALAITTEET

Tutkimuksessa käytettäväksi valittiin tavoitteiden kannalta tarkoituksenmukaisimmat mittaamenetelmät. Tutkimuksen ensisijaisena tavoitteena oli rakenteen kuivumisajan määrittäminen arvostelusyvytydellä. Lisäksi haluttiin määrittää rakenteen kosteusjakauma sillä hetkellä, kun asetetut tavoitekosteuspitoisuudet saavutetaan arvostelusyvytydellä.

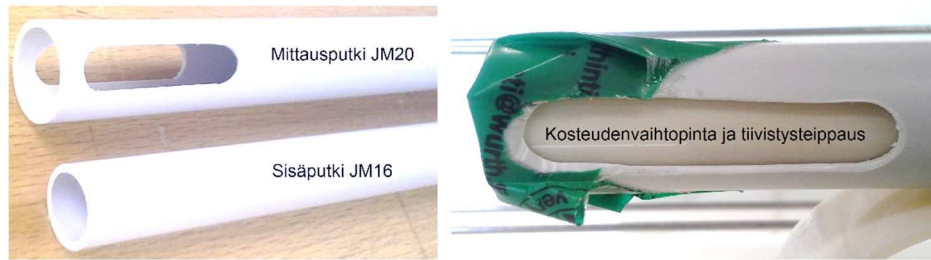
Nämä tavoitteet huomioiden, rakenteiden huokosilman suhteellista kosteutta oli mitattava arvostelu syvyydeltä sekä lisäksi yhdeltä tai kahdelta muulta syvyydeltä. Materiaalin pinnalla suhteellisen kosteuden voidaan arvosteluhetkellä olettaa olevan huoneilman suhteellisen kosteuden tasolla.

5.1 Tutkimuksessa käytetyt mittaamenetelmät

Tässä tutkimuksessa ensisijainen huokosilman suhteellisen kosteuden mittaamenetelmä oli mittaus valuuun asennettavista mittausputkista. Mittausta varten kehitettiin mittausputket, joissa kosteudenvaihtopinta on riittävän suuri verrattuna mittausputken tilavuuteen, mittausputkihan on periaatteessa kuin materiaalisissa oleva valtavan suuri huokonen.

Mittausputkeen tehtiin jyrsimällä noin 380 mm^2 reiät putken vastakkaisille puolille, jolloin putken yhteenlaskettu kosteudenvaihtopinta-ala on noin 760 mm^2 . Koko mittausputken tilavuus oli noin 58000 mm^3 , mutta mittausten aikana ilmatilavuus jää huomattavasti pienemmäksi, koska anturi täyttää suurimman osan mittausputkesta, jolloin ilmatilavuudeksi jää noin 8000 mm^3 .

Kosteudenvaihtopinnat sijoitettiin putken keskilinjan kohdalle putken sivuille, jolloin pintaa kohti suuntautuva kosteusvirta ei aiheuta poikkeavaa kertymää mittausputkeen (vrt. jos kosteudenvaihtopinta olisi putken pohjalla tai päällä). Valun ajaksi kosteudenvaihtopinnat tukittiin tiiviillä sisäputkella (tiivistysteippaus sisäputken ympärillä) ja putken pää suljettiin höyrynsulkuteipillä. Kuvassa 5.1 on esitetty tutkimuksessa käytetty, valuuun asennettava mittausputki.



Kuva 5.1 Tutkimuksessa käytetty valuun asennettava mittausputki. Putket valmistettiin jäykästä muoviputkesta (JM16 ja JM20). Sisäputki sovitettiin tiiviiksi mittausputkeen kirkkaalla pakkausteipillä ja putken pää suljettiin ARRON FLEX höyrynsulkuteipillä (leveys 60mm, paksuus 0,22 mm, materiaali verkkovahvistettu LD-polyeteeniä, akryylipohjainen liima).

Materiaalin huokosilman suhteellista kosteutta mitattiin myös tarkaksi mittausmenetelmäksi mainitulla porareikämittauksella, joissa mittausputkena oli huolellisesti tiivistetty jäykkä muoviputki (JM16 tai JM20). Porareikämittauksia tehtiin sekä jatkuvalla seurannalla, että määrääjain toteutetuilla mittauksilla. Huokosilman suhteellisen kosteuden mittauksiin käytettiin edellä mainittujen lisäksi kiinteästi valuun asennettavia mittalaitteita. Näissä mittalaitteissa mittausputki on kiinteä osa anturin rakennetta.

Kokeellisena mittausmenetelmänä käytettiin ruostumattomasta teräslangasta valmistettuja kapasitanssineulapareja, jotka sijoitettiin samoille syvyyksille kuin suhteellisen kosteuden mittalaitteet. Mittaustuloksina saatiin kattavasti tietoa huokosilman suhteellisen kosteuden vaikutuksesta materiaalin kapasitanssiin.

5.2 Tutkimuksessa käytetyt mittalaitteet

5.2.1 Rotronic AG:n laitteet

Tutkimuksessa käytettiin ensisijaisesti tallentavaa mittauslaitteistoa, jonka on valmistanut sveitsiläinen Rotronic AG. Yksi laitteisto koostuu HygroLog HL-NT3 dataloggerista, kolmesta HygroClip HC2-S anturista sekä 5 m pitkistä kaapeleista, joilla anturit yhdistettiin dataloggeriin. Laitteistoa ohjataan HW4 ohjelmistolla, joka toimii Microsoft Windows käyttöjärjestelmissä. Ohjelmoinnin ajaksi laitteiston loggeri kytketään telakkaan, joka on kytketty tietokoneeseen USB kaapelilla. Tallennetut tiedot ladataan tietokoneelle telakan kautta tai erillisellä muistikortinlukijalla. Tallennusmuotona on Rotronic log files (.log) tai taulukkolaskenta muotoinen tiedosto (.xls). Esitellään seuraavaksi käytössä ollut laitteisto tarkemmin. Kaikki tiedot perustuvat Rotronicin tuotekortteihin ja ohjeisiin.

Tässä tutkimuksessa käytössä oli enimmillään 30 Rotronic-laitteistoa eli 90 anturia yhtä aikaa. Laitteilla mitattiin huokosilman suhteellista kosteutta mittausputkista laboratorio-kokeissa ja kenttäkohteilla. Lisäksi laitteilla tallennettiin huoneolosuhteita. Rotronic-laitteiston mittaustarkkuuteen ja käyttöön liittyvät ominaisuudet on esitetty taulukossa 5.1.

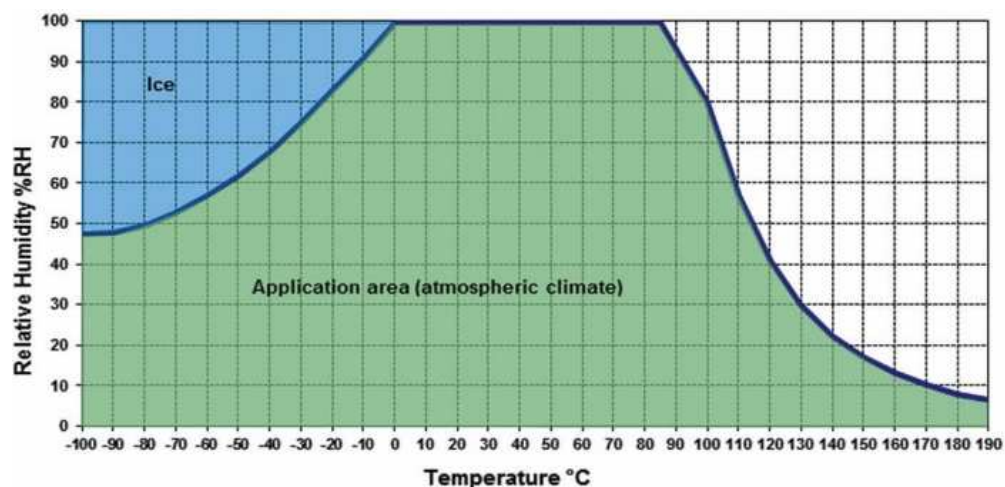
5.2.1.1 Rotronic-laitteiston osat

HygroLog HL-NT3 dataloggerissa on kolme kanavaa antureille ja jokaista kanavaa voidaan ohjata erikseen. Loggerilla pystytään tallentamaan anturien mittaamia suhteellisen kosteuden arvoja väliltä 0...100 % RH ja lämpötilaa väliltä -100...+200 °C, anturityypistä riippuen. Dataloggerin sisäinen kello ohjelmoidaan samaan aikaan ohjelmointiin käytettävän tietokoneen kanssa, jolloin mittaustulokset on helppo yhdistää esimerkiksi ulkoilman vuorokauden- tai vuodenajasta aiheutuviin olosuhdemuutoksiin.

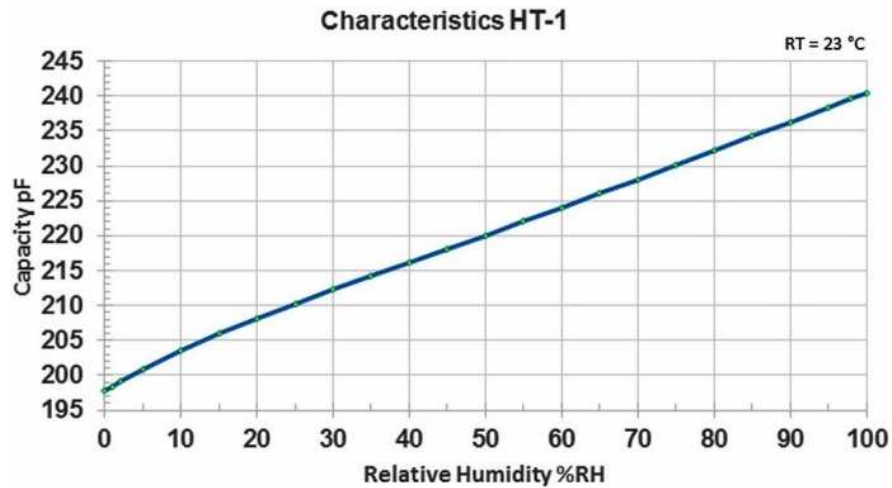
Loggerissa itsessään ei ole antureita, mutta loggeri voidaan ohjelmoida laskemaan erilaisia johdannaissuureita antureilla mitatuista lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvoista. Laskettavissa olevia johdannaissuureita ovat muiden muassa kastepiste, vesihöyrypitoisuus, vesihöyryn osapaine sekä vesihöyryn kyllästysosapaine.

HygroClip HC2-S anturi sisältää Pt100 Class A (IEC 751) lämpötila-anturin sekä kapasitiivisen kosteusanturin. Lämpötila-anturin toiminta-alueeksi ilmoitetaan -100...+200 °C, mutta koko anturin toiminta-alueen rajaa muun elektroniikan lämpötilankesto. Koko HC2-S anturin toiminta-alue kattaa lämpötilat väliltä -50...+100 °C. Kosteusanturin tuotenimi on Rotronic Hygromer® IN1 ja se toimii koko suhteellisen kosteuden mittausalueella 0...100 % RH.

Kuvassa 5.2 on esitetty Rotronic Hygromer® IN1 kosteusanturin toiminta-alue ja kuvassa 5.3 anturin väliaineen kapasitanssin riippuvuus ilman suhteellisesta kosteudesta. Kosteusanturin tuotekortissa on esitetty myös erilaisten kemikaalirasitusten raja-arvoja, joiden ylittyessä mittaustulokset eivät ole enää luotettavia. HygroClip HC2-S anturien tiivisyysluokitus on IP65, eli ne ovat täysin pölytiivisiä ja vesisuihkulta suojattuja. Mittapään suojana käytettiin vakiosuodatinta, joka on polykarbonaattikehykseen asennettu, polyetyleenissuodatin 20 µm rei'ityksellä. HC2-S anturiin on sisäänrakennettu mikrosiru (Air-Chip3000), joka pystyy korjaamaan mittaustuloksia automaattisesti ja jonka ansiosta anturi pystytään vaihtamaan suoraan laitteistosta toiseen, ilman laitteiston läpi kalibrointia.

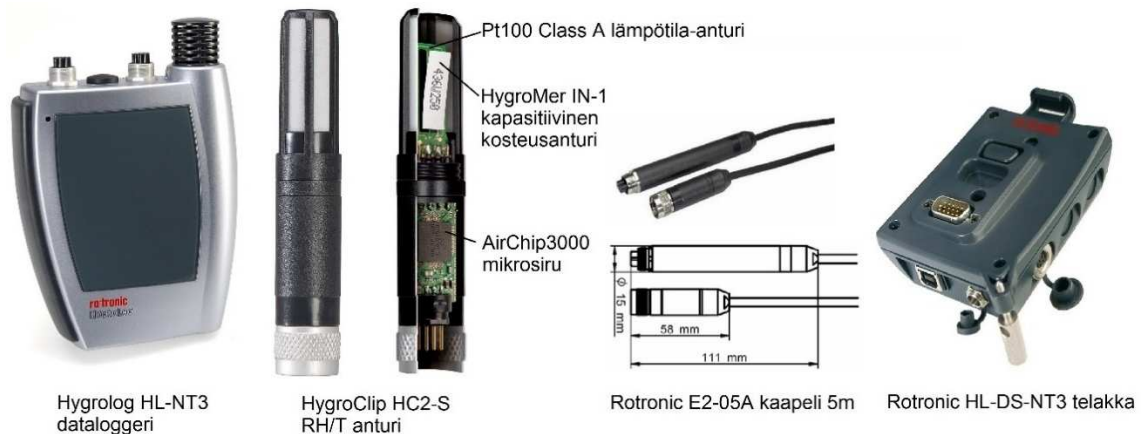


Kuva 5.2 HygroMer IN-1 kapasitiivisen kosteusanturin toiminta-alue. (Rotronic).



Kuva 5.3 HygroMer IN-1 kapasitiivisen kosteusanturin kapasitanssin ja suhteellisen kosteuden välinen yhteys +23 °C lämpötilassa. Sovitekäyrä on saatu 5. asteen polynomifunktiolla $Y=A_0+A_1*x+A_2*x^2+A_3*x^3+A_4*x^4+A_5*x^5$, missä $A_0=2,00000E+02$, $A_1=7,12550E-01$, $A_2=-1,19025E-02$, $A_3=2,01789E-04$, $A_4=-1,59209E-06$ ja $A_5=4,65615E-09$ (Rotronic).

Anturit yhdistettiin loggereihin 5 m:n pituisilla Rotronic E2-05A tai E2-05S kaapeleilla. A tunnuksella merkityssä kaapelissa on pitkät liittimet anturin päässä ja S tunnuksella merkityssä lyhyet, muuta eroa kaapeleissa ei ole. Laitteistot yhdistettiin tietokoneeseen Rotronic HL-DS-NT3 telakalla, joka kytketään tietokoneeseen USB kaapelilla. Laitteistot ohjelmoitiin käyttöön Rotronic HW4 ohjelmistolla. Kuvassa 5.4 on esitelty Rotronic mittalaitteistoon kuuluvat osat.



Kuva 5.4 Tutkimuksessa käytetyt Rotronic laitteet (Rotronic).

5.2.1.2 Rotronic-laitteiston säätö

Osa tutkimukseen varatuista Rotronic laitteista oli uusia, joten ne otettiin käyttöön suoraan ilman tarkistusta tai kalibrointia. Kaikki aiemmissa tutkimuksissa käytössä olleet laitteet sen sijaan testattiin ja säädettiin kohdalleen ennen käyttöönottoa.

Säätöön (kalibrointiin) käytettiin HW4 ohjelmiston Adjust toimintoa, jolla anturin mitaamaa lukemaa verrataan tunnettuun referenssiarvoon. HC2-S anturien lämpötilan mitaus voidaan kalibroida yhdessä tai kahdessa referenssipisteessä. Yhdessä pisteessä tehtynä ohjelmisto vain siirtää lämpötilakäyrän muuttamatta lineaarisen lämpötilakuvaajan kaltevuutta. Kahden pisteen avulla ohjelma pystyy säätämään sekä kuvaajan kaltevuutta, että sijaintia.

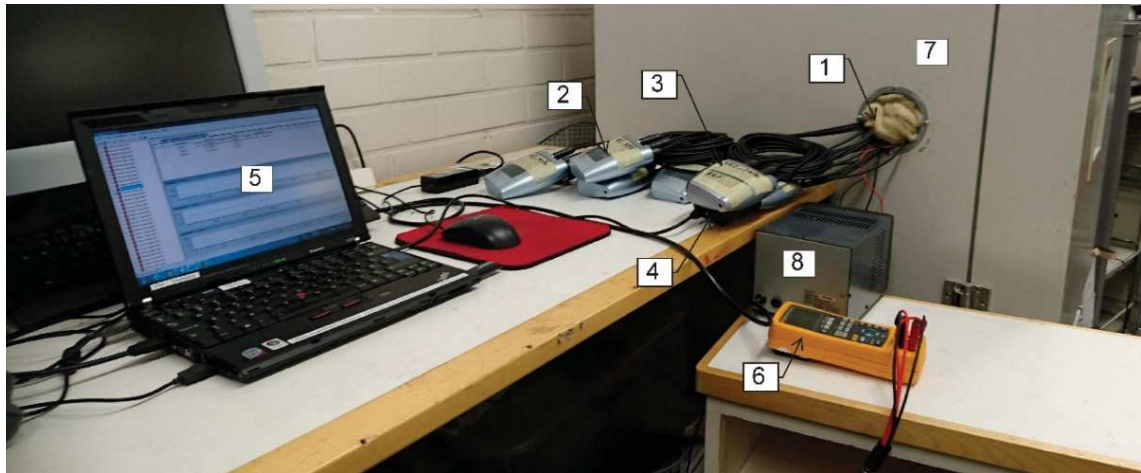
HC2-S anturien suhteellisen kosteuden mittaus pystytään säätämään kohdalleen yhdestä neljään referenssipisteen perusteella. Yhden ja kahden pisteen kalibroinnin vaikutus on vastaava kuin lämpötilakalibroinnissa. Kolmen ja neljän pisteen perusteella tehdyllä säädöllä pystytään vaikuttamaan myös kuvaajan muotoon, koska kuvaaja ei ole lineaarinen. Ohjelmisto laskee referenssipisteiden perusteella sovitekäyrille automaattisesti uudet kerroimet ja korjaa havaitut mittausvirheet.

Rotronic laitteiden säätö ja tarkistus tehtiin kalibrointikaapissa, johon pystyttiin määrittämään tasainen lämpötila ja joka samalla poisti ympäristön olosuhdemuutosten vaikutukset. Olosuhteiden annettiin tasaantua lämpökaapissa aina 6...12 h ennen antureiden säätöä, jolloin oli varmasti saavutettu tasapainotilanne. Käytäntönä säädössä pidettiin, että ensin säädettiin lämpötilan mittaus, koska lämpötilan vaikutus suhteellisen kosteuden arvoon on merkittävä.

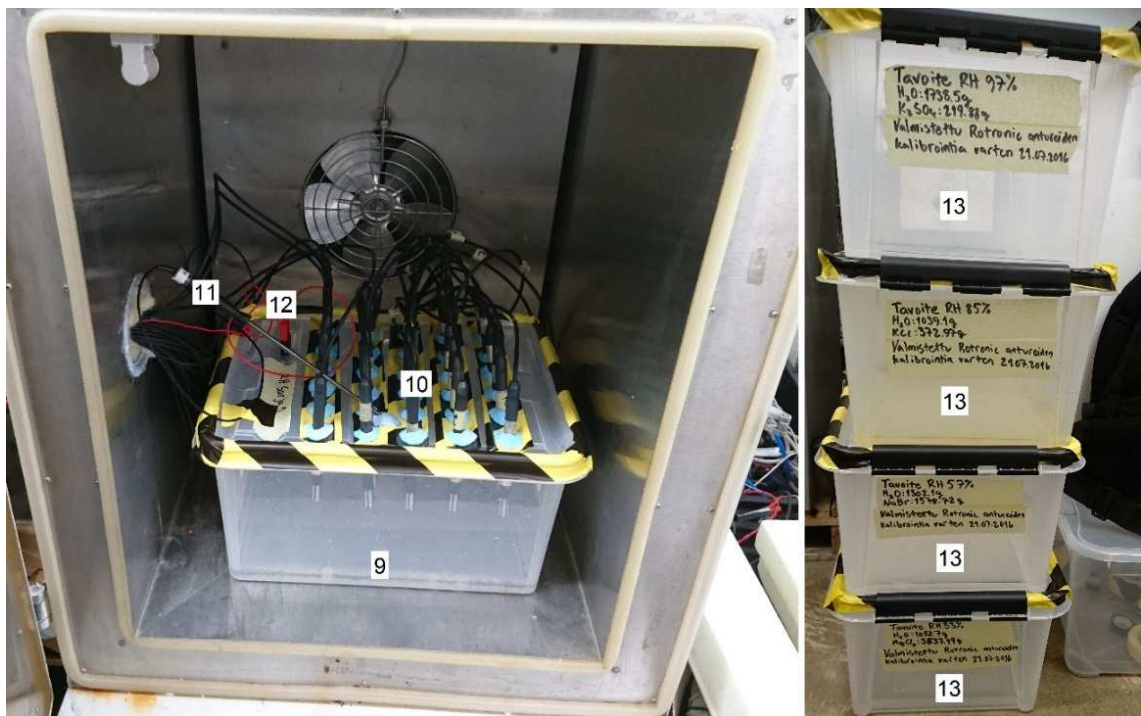
Alempi lämpötilareferenssipiste oli noin +5 °C ja ylempi noin +20 °C. Lämpötilan referenssiarvot määritettiin vähintään kolmen uuden ja käyttämättömän HC2-S anturin mitaustulosten keskiarvona. Kosteussäätö tehtiin neljän pisteen perusteella ja kosteusreferenssipisteet määritettiin samassa noin +20 °C, jota käytettiin ylempään lämpötilareferenssin määrittämisessä. Referenssiolosuhteet muodostettiin tiiviiseen muoviasiaan lähteen (Greenspan 1976) mukaisilla kylläisillä suolaliuoksilla, jotka valmistettiin ionivaihdettuun veteen.

Säädössä käytettävät suolaliuokset valittiin siten, että koko mittausalue saadaan katettua. Suoloina käytettiin kaliumsulfaattia ($K_2SO_4 \rightarrow \sim 97,6 \% RH$), kaliumkloridia ($KCl \rightarrow \sim 85,1 \% RH$), natriumbromidia ($NaBr \rightarrow \sim 58,7 \% RH$) ja magnesiumkloridia ($MgCl_2 \rightarrow \sim 33,1 \% RH$); suolan kemiallisen merkinnän yhteydessä on ilmoitettu kylläisen suolaliuoksen muodostama suhteellinen kosteus +20 °C lämpötilassa.

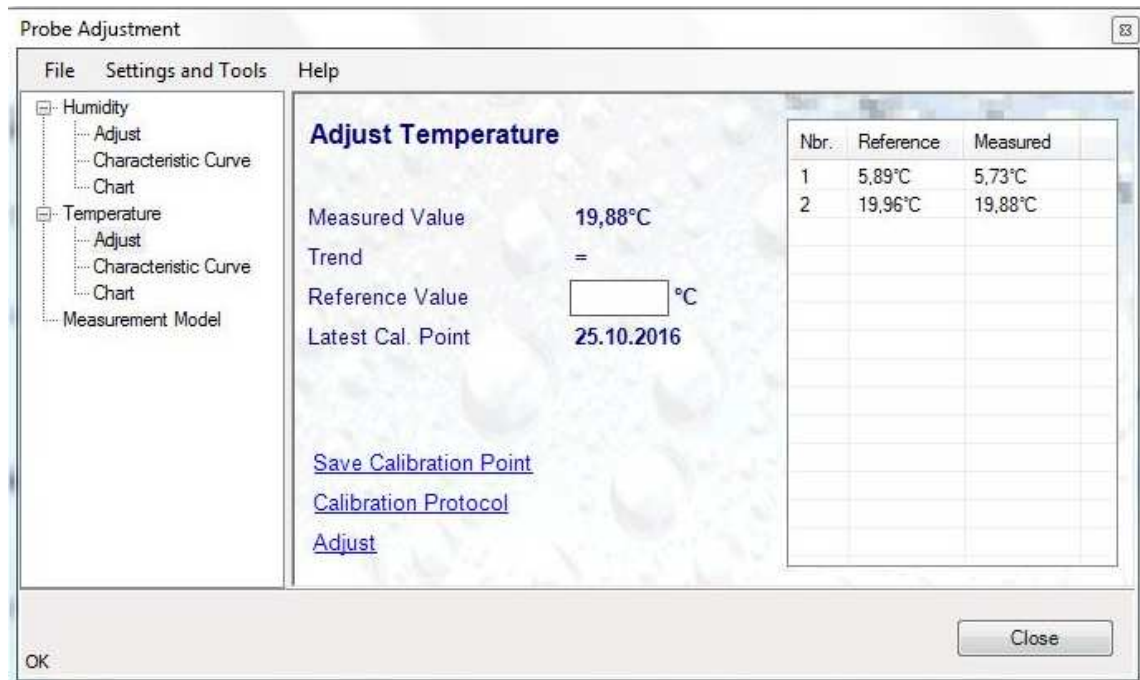
Säätö tehtiin aina samassa suunnassa, missä tutkimuskin tulee etenemään, eli korkeimmasta suhteellisen kosteuden arvosta kohti matalinta. Kosteussäädössäkin referenssikosteuspiste määritettiin vähintään kolmen uuden ja käyttämättömän HC2-S anturin mitaustuloksen keskiarvona, koska lämpökaappia ei saatu säädettyä tarkalleen +20 °C lämpötilaan ja muodostuvan suhteellisen kosteuden arvo riippuu voimakkaasti lämpötilasta. Kuvissa 5.5 ja 5.6 on esitetty Rotronic-laitteiston säädössä tarvittava kalusto ja kuvissa 5.7-5.10 esimerkit säädön yhteydessä tallennetuista referenssipisteistä ja käyristä.



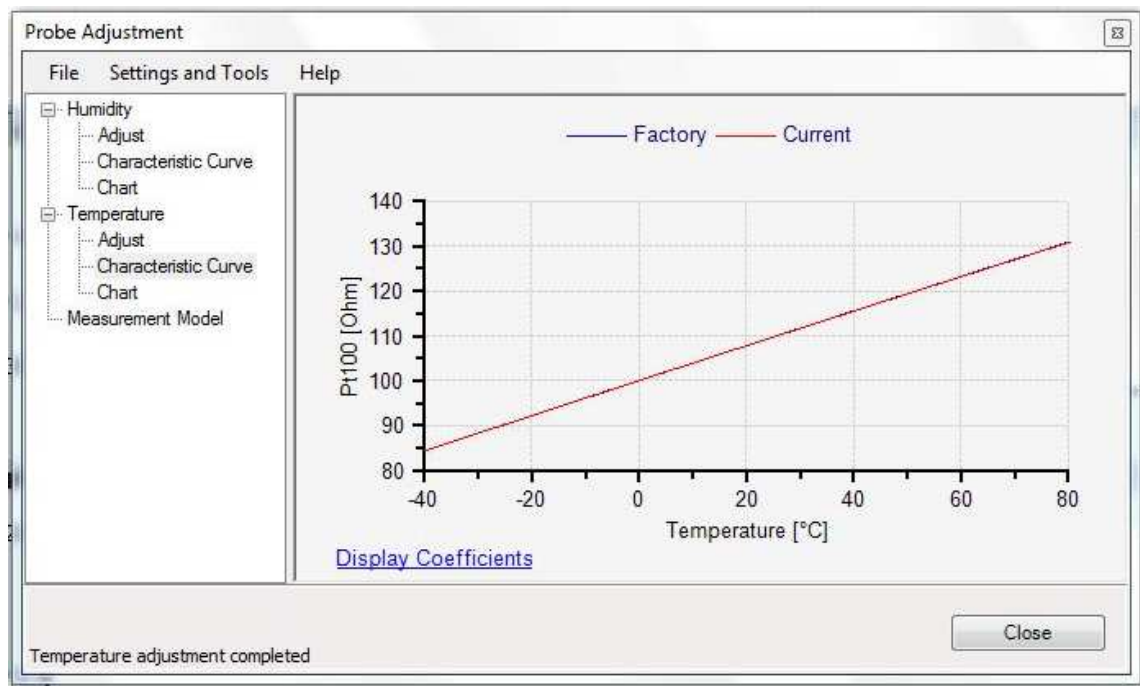
Kuva 5.5 Rotronic-laitteiston tarkistuksessa ja säädössä käytettyä kalustoa. 1.Anturit vietään lämpökaappiin kyljessä olevasta reiästä, joka eristetään, 2.Dataloggeri, jossa säädettävät anturit, 3.Referenssiloggeri, jossa uudet anturit, 4.Rotronic telakka, 5.Rotronic HW4 ohjelmisto, jolla anturit säädetään, 6.Fluke 726 -monitoimiprosessikalibraattori, jossa on kiinni erillinen Pt100 sauva-anturi (referenssi), 7.Kalibroitinkaappi, jota voidaan lämmittää ja jäähdyttää, 8.Olosuhdeastian tuulettimen virtalähde (12V).



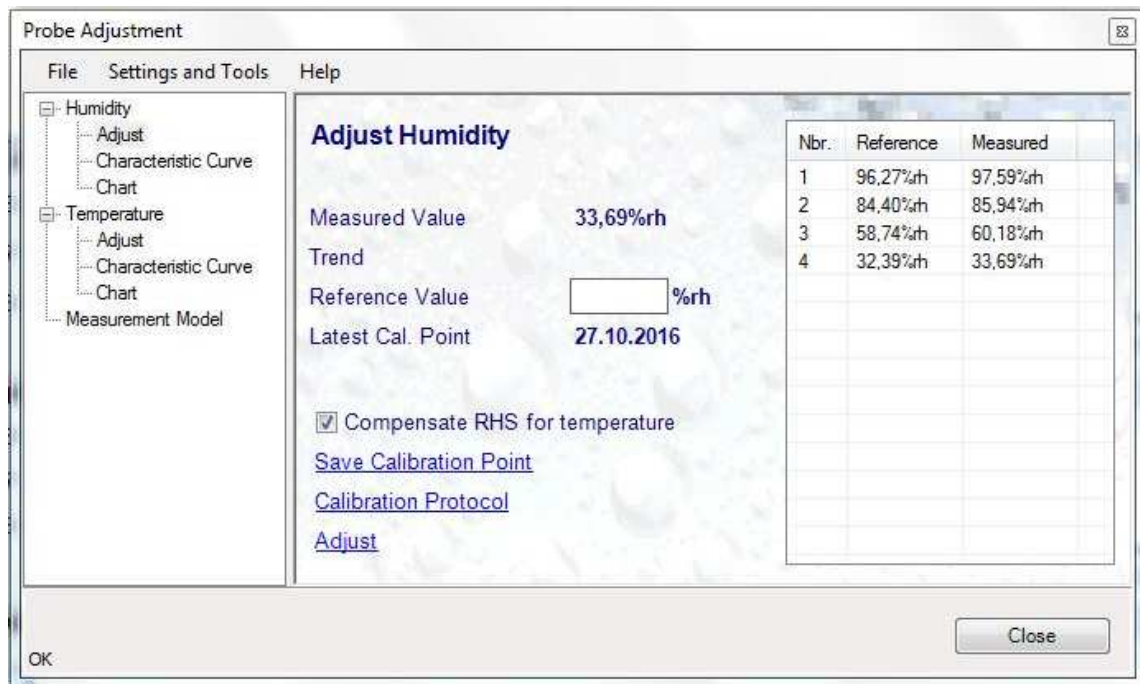
Kuva 5.6 Rotronic-laitteiston tarkistuksessa ja säädössä käytettyä kalustoa. 9.Tiivistetty olosuhdeastia, jossa kylläinen suolaliuos, 10.HC2-S anturit tiivistettynä laatikon kanteen teipillä ja sinitaralla, 11. Pt100 Sauva-anturi (referenssi), 12.Olosuhdeastian tuuletin, jolla varmistetaan, että laatikon ilmatila sekoittuu eikä kerroistu, 13.Suolaliuokset.



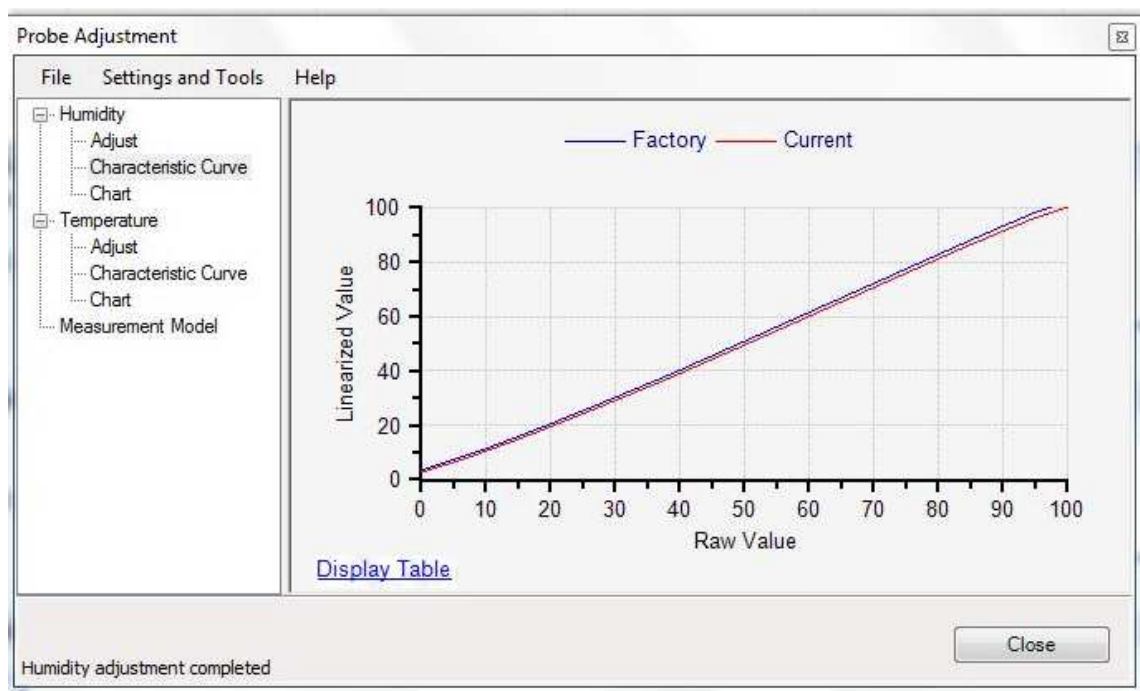
Kuva 5.7 Rotronic HW4 ohjelman adjust toiminto, lämpötilareferenssien tallennus.



Kuva 5.8 Rotronic HW4 ohjelman adjust toiminto, lämpötilan mittauksen säädön vaikutus. Kuvasta havaitaan, että mitatut arvot antavat saman tuloksen kuin tehdaskalibrointi ja kuvaajat ovat päällekkäin. Pt100 anturi on säilyttänyt ominaisuutensa varsin hyvin.



Kuva 5.9 Rotronic HW4 ohjelman adjust toiminto, kosteusreferenssien tallennus.



Kuva 5.10 Rotronic HW4 ohjelman adjust toiminto, suhteellisen kosteuden mittauksen säädön vaikutus. Kuvasta havaitaan, että mitatut arvot ovat poikenneet hieman referenssi arvoista, joten ohjelma on siirtänyt käyrää hieman alaspäin. Kuvaajien muodot kuitenkin vastaavat edelleen toisiaan, joten kaikissa kosteusasteissa eroavaisuus on ollut saman-suuntainen.

5.2.2 Wiiste Oy:n laitteet

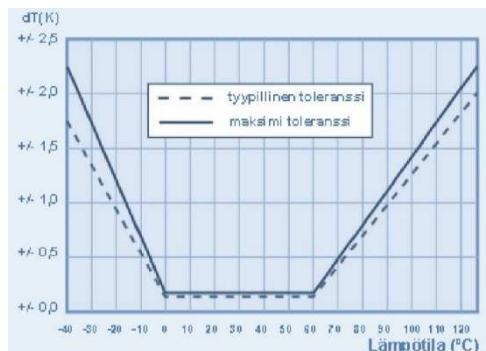
Laboratoriotutkimuksessa käytettiin kotimaisen Wiiste Oy:n SolidRHTM - kosteuden hallintajärjestelmää rinnakkaisena tutkimusmenetelmänä. Järjestelmä on kehitetty betonin ja sementtipohjaisten tasoitteiden suhteellisen kosteuden mittaukseen ja se sisältää useita erilaisia anturityyppejä, lukulaitteen oheistarvikkeineen sekä ohjelmistot tiedonsiirtoon ja mittausten suunnitteluun ja dokumentointiin.

Tässä tutkimuksessa käytettiin vain SolidRH SH1 antureita ja SolidRH RD1 lukulaitetta sekä Relia -tiedonhallintaohjelmistoa. Laitteistolla pystytään mittaamaan suhteellisen kosteuden arvoja väliltä 10...100 % RH ja laitteiston käyttölämpötila voi olla välillä 0...+40 °C. Järjestelmän kaikki anturit ovat etäluettavia ja niistä saatavat mittaustulokset kerätään pilvipalveluna toteutettuun Relia-tiedonhallintaohjelmistoon. Jokaisella järjestelmän anturilla on yksilöllinen sarjanumero, jonka perusteella ladatut tiedot yhdistyvät oikeaan mittauspisteeseen tiedonhallintaohjelmassa. Mittauspisteet ja mittaussyvyydet määritellään asennussuunnitelmassa, joka tehdään Relia-tiedonhallintaohjelmaan. Asennussuunnitelmaa varten Reliaan ladataan kohteen pohjakuva, johon määritetään mittauspisteiden sijainti ja antureiden mittaussyvyydet. Esitellään seuraavaksi käytössä ollut laitteisto tarkemmin. Kaikki tiedot perustuvat Wiiste oy:n tuotekortteihin ja ohjeisiin, ellei muita lähteitä ole mainittu.

Tässä tutkimuksessa käytössä oli 45 kpl Wiiste SolidRH SH1 antureita ja yksi SolidRH RD lukulaite. Kaikki laitteet olivat uusia, joten ne otettiin käyttöön suoraan ilman tarkistusta tai kalibrointia. Laitteilla mitattiin laboratoriokoekappaleiden huokosilman suhteellista kosteutta. Wiiste-laitteiston mittaustarkkuuteen ja käyttöön liittyvät ominaisuudet on esitetty taulukossa 5.1.

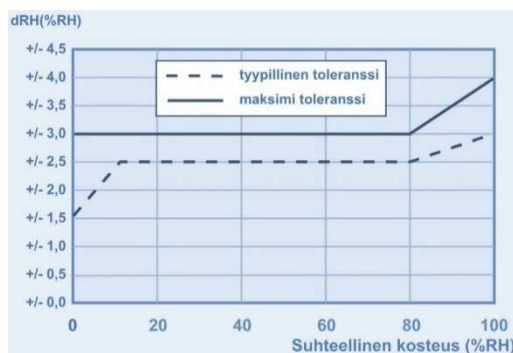
5.2.2.1 Wiiste-laitteiston osat

SolidRH SH1 anturissa lämpötilan mittaukseen käytetään PTAT (Proportional To Absolute Temperature) -periaatteella toimivaa anturia. Lämpötila-anturin mittaustarkkuus on esitetty kuvassa 5.10. Kuvaajasta nähdään, että anturin mittaustarkkuus heikkenee PTAT antureille tyypillisesti, rajatun toiminta-alueen ulkopuolella.



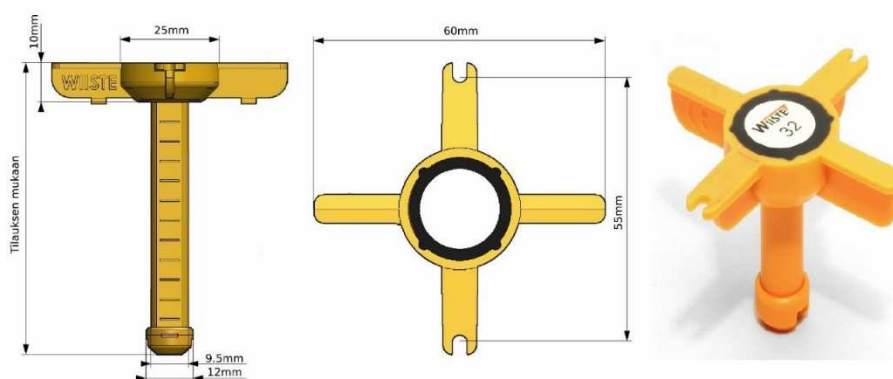
Kuva 5.10 SolidRH SH1 anturin lämpötilan mittaustoleranssi.

Suhteellisen kosteuden mittaukseen SolidRH -kosteuden hallintajärjestelmässä käytetään kapasitiivista kosteusanturia, jonka toimintaperiaate on esitelty luvussa 4.2. Anturilla ei ole erillistä tuotenimeä, eikä sitä ole kuvailtu muulla tavoin kuin ilmoittamalla, että väliaineena toimii kapasitiivinen polymeeri. Kuvassa 5.11 on esitetty SolidRH SH1 anturin suhteellisen kosteuden mittaustoleranssi.



Kuva 5.11 SolidRH SH1 anturin suhteellisen kosteuden mittaustoleranssi +23 °C lämpötilassa. Anturin toiminta-alueeksi on ilmoitettu 10... 100 %RH, joskin suhteellisen kosteuden ollessa yli 80% RH mittaustarkkuus heikkenee.

Rakenteeltaan SolidRH SH1 anturi on muovirunkoon kasattu asennusvalmis mittalaite (kuva 5.12), jonka mittaussyvyys on säädetty halutuksi katkaisemalla anturissa oleva mittausputki sopivan pituiseksi. Mittaussyvyys voidaan valita väliltä 15...70 mm luvussa 2.5 esitettyjä arvostelussyvyyden määrittelyn ohjeita noudattaen.



Kuva 5.12 SolidRH SH1 anturi. (Wiiste Oy) Mittaussyvyys säädetään katkaisemalla mittausputki tilauksen mukaisesti. Mittaussyvyys merkitään anturin päälle liimattavaan tarraan.

Katkaisun jälkeen mittausputki peitetään rei'itetyllä tulpalla, jonka kautta mitattava huokosilma on yhteydessä kosteusanturiin. Anturin tiiviysluokitukseksi ilmoitetaan IP57, joten anturi on suojattu pölyltä ja se kestää hetkellisen upotuksen veteen. Anturin mittalaitteet on sijoitettu rakenteen pintaan jäävään osaan, mutta mittalaitteiden sijoittelussa on huomioitu 2 mm hiomavara, joten massan kovettumisen jälkeen valun pinta voidaan tarvittaessa hioa.

5.2.2.2 Wiiste-laitteiston asennus ja käyttö

Anturit asennetaan betoniin tai tasoitteeseen asennussuunnitelman mukaisesti valun yhteydessä. Anturit painetaan oikeaan korkoon linjattuun massaan pystysuorassa asennossa, putki alaspäin siten, että anturin yläpinta jää massan pinnan tasolle (kuva 5.13). Liian syvälle tai vinoon asennetut anturi on asennettava uudelleen. Oikein asennettuna umpinaiseen mittausputkeen jää ilmaa ja massassa mahdollisesti oleva vapaa vesi ei pääse nousemaan mittausantureihin asti.



Kuva 5.13 SolidRH SH1 anturien asennus. (Wiiste Oy).

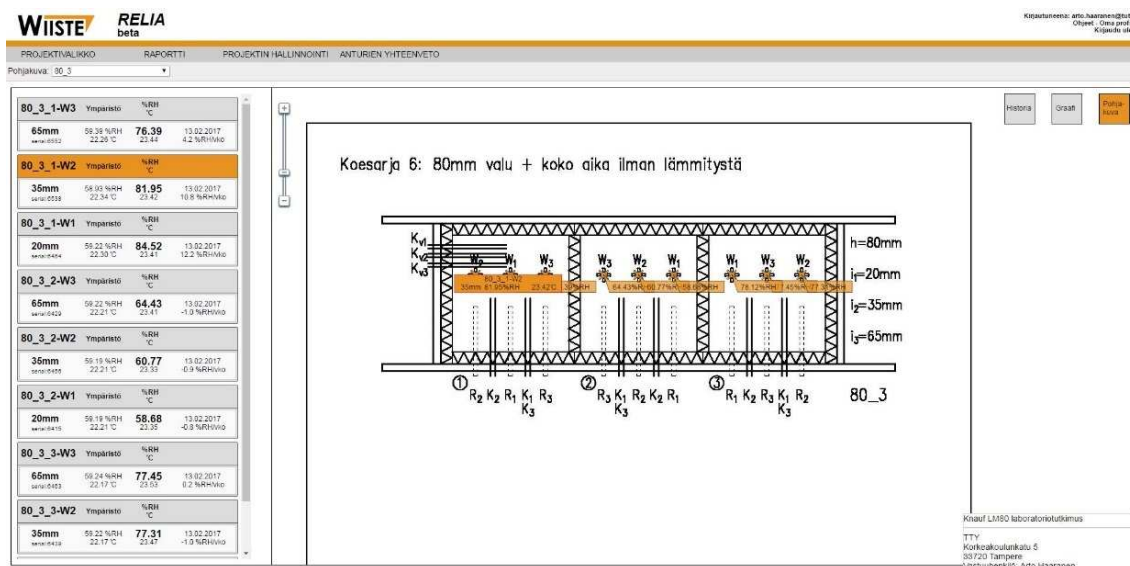
SolidRH SH1 anturissa ei ole erillistä akkua tai muuta teholähdettä. Tarvitsemansa energian ne saavat langattomasti SolidRH RD1 lukulaitteesta samalla kun antureista luetaan mittauks tulokset lukulaitteen muistiin. Myös lukulaitteessa on anturit lämpötilan ja suhteellisen kosteuden mittauks ta varten, joten tilassa vallitsevat olosuhteet saadaan tallennettua samalla kun anturit luetaan. Tästä syystä myös lukulaitteen on annettava tasaantua tilassa vallitseviin olosuhteisiin ennen anturien lukua. Anturit voidaan lukea enintään 40 mm etäisyydeltä anturin yläpuolelta, joten seuranta voidaan jatkaa myös sen jälkeen, kun rakenne on pinnoitettu. SolidRH RD1 lukulaite oheistarvikkeineen on esitelty kuvassa 5.14.



Kuva 5.14 SolidRH RD1 lukulaite oheistarvikkeineen. (Wiiste Oy).

Lukulaitteen muistiin tallennettu mittausdata siirretään Relia -tiedonhallintaohjelmistoon. Tiedonsiirtoon lukulaitteen ja Relia pilvipalvelun välillä käytetään Wiiste oy:n Wsync ohjelmaa, joka toimii Microsoft Windows käyttöjärjestelmissä.

Relia -tiedonhallintaohjelmistossa mittaustuloksia pystyy tarkastelemaan pohjakuvaan sijoitettuna (kuva 5.15), taulukoituna tai graafisina kuvaajina selaimessa. Palvelulla pystytään tulostamaan myös raportti, jossa esitetään kahdeksan viimeisimmän mittauksen tulokset taulukkomuodossa sekä graafinen esitys noin kaksi kuukautta raportin tulostushetkestä taakse päin.



Kuva 5.15 Relia -tiedonhallintaohjelmistossa mittauspisteet merkitään pohjakuvaan (tässä tapauksessa koekappalemuotti) ja anturit nimetään ja sijoitetaan oikeisiin mittauspisteisiin.

SolidRH laitteiden ja antureiden ainoaksi sallituksi huoltotoimenpiteeksi mainitaan ulkoinen puhdistus, mietoon saippualliuokseen kastetulla nukkaamattomalla liinalla. Kaikki anturit toimitetaan tehdaskalibroituina ja ohjeiden mukaisesti säilytettynä ja asennettujen antureiden kalibrointi on voimassa yhden vuoden ajan. SolidRH SH1 anturit asennetaan valuun ja jätetään rakenteeseen, joten niitä ei kalibroida enää käytön aikana. Lukulaitteissa olevat anturit suositellaan kalibroitavaksi kerran vuodessa. Wiiste Oy vastaa vaativammista huoltotoimenpiteistä ja antureiden kalibroinnista.

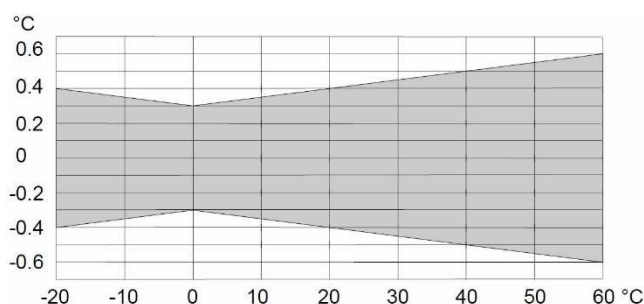
5.2.3 Vaisala Oyj:n laitteet

Kotimainen Vaisala Oyj tarjoaa kattavasti mittausratkaisuja etenkin teollisuuden tarpeisiin sekä säätö- ja havainnointiin ja mittaukseen. Tämän tutkimuksen kenttämittauksissa käytettiin Vaisala Humicap® HMI41 näyttölaitetta ja HMP44(L) RH-&T- mittapäitä. Tutkimuksessa käytetyt laitteet kalibroitiin Vaisala HMK15 kosteuskalibraattorilla ennen mittauksia ja ne tarkastettiin myös tutkimuksen jälkeen. Tutkimuksessa käytetty laitteisto on vastaava, jota käytetään yleisesti rakennusalaalla rakennekosteusmittauksiin (Merikallio 2016, Merikallio 2009, RT 14-10984). Vaisala-laitteiston mittaustarkkuuteen ja käyttöön liittyvät ominaisuudet on esitetty taulukossa 5.1.

5.2.3.1 Vaisala-laitteiston osat

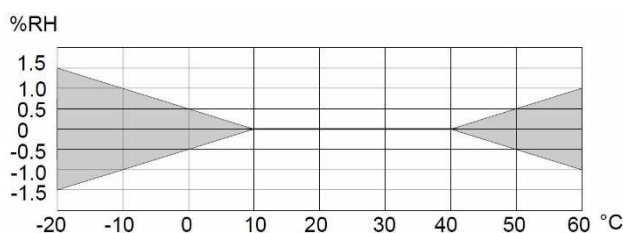
Vaisala Humicap® HMI41 näyttölaitteella luetaan HMP44 mittapäiden mittaustuloksia. Lukulaitteen muistiin tallennetaan käytettävien mittapäiden yksilölliset korjauskertoimet, joten kalibroinnin yhteydessä muodostettuja laiteryhmiä ei tule sekoittaa mittauksissa. Laitteistolla pystytään tallentamaan mittaustietoja myös automaattisesti, mutta tässä tutkimuksessa tiedot tallennettiin manuaalisesti. Laitteella pystytään määrittämään laskennallisesti kastepistelämpötila, absoluuttinen kosteus, märkälämpötila sekä sekoitussuhde. Laitteen tiiviysluokitus on IP53, eli se on pölyltä ja enintään 60 asteen kulmassa satavalta vedeltä suojattu, kun liittimet on suojattu.

Vaisala HMP44 ja HMP44L mittapäissä käytetään Pt1000 (IEC 751) 1/3 luokka B vastusanturia, joka vastaa mittaustarkkuudeltaan nykyisen määritelmän mukaista luokkaa AA. Lämpötila-anturille ei ole ilmoitettu pitkäaikaista stabiiliutta. Kuvassa 5.16 on esitetty mittapäissä käytetyn lämpötila-anturin mittaustarkkuus koko mittausalueella.



Kuva 5.16 Vaisala HMP44 ja HMP44L mittapäissä käytetyn Pt1000 vastusanturin mittaustarkkuus koko mittausalueella. (Vaisala).

Vaisala HMP44 ja HMP44L mittapäissä suhteellisen kosteuden mittaukseen käytetään Vaisala Humicap® kapasitiivista ohutkalvopolymeerianturia, joka soveltuu suhteellisen kosteuden mittaukseen koko mittausalueella 0...100 % RH. Anturin mittaustarkkuus on jopa ± 1 % RH ja sillä mainitaan olevan erinomainen pitkän aikavälin stabiilius. Kondenssin estämiseksi anturi on lämmitetty. Anturien mainitaan kestävän hyvin pölyä ja kemikaaleja. Kostuneen anturin suorituskyky palautuu ennalleen kalibroinnin jälkeen. Kuvassa 5.17 on esitetty Humicap® kosteusanturin mittaustarkkuuden lämpötilariippuvuus koko lämpötilan mittausalueella.



Kuva 5.17 Vaisala HMP44 ja HMP44L mittapäissä käytetyn Humicap® kosteusanturin mittaustarkkuuden lämpötilariippuvuus koko lämpötilan mittausalueella. (Vaisala).

HMP44 mittapäässä on 0,3 m:n pituinen kaapeli ja HMP44L mittapäässä kaapelin pituus on 2,7 m. Mittapäiden tiiviysluokitus on IP65 eli ne ovat täysin pölytiiviiä ja vesisuihkulta suojattuja. Mittapään anturit on suojattu 17039HM kalvosuotimella, mutta suodatimen erotustarkkuutta tai rei'ityksen kokoa ei mainita.

5.2.3.2 Vaisala-laitteiston säätö

HMP44(L) mittapää on kalibroitu tehtaalla, mutta ennen käyttöönottoa niille on määritettävä korjauskertoimet HMI41 näyttölaitteen muistiin. Korjauskertoimien määrittäminen voidaan tehdä yhden tai kahden pisteen kosteuskalibrointina. Tässä tutkimuksessa käytettiin kahden pisteen kosteuskalibrointia, johon määritettiin tarkat referenssipisteet Vaisala HMK15 kosteuskalibraattorilla.

Kuvassa 5.18 on esitetty kalibrointiin käytetty HMK15 kosteuskalibraattori sekä kalibroittavat mittalaitteet. Kalibroinnissa matalimpana kosteusreferenssinä käytettiin magnesiumkloridiliuosta ($\text{MgCl}_2 \rightarrow \sim 33,1 \% \text{ RH}$) ja korkeimpana kaliumsulfaattiliuosta ($\text{K}_2\text{SO}_4 \rightarrow \sim 97,6 \% \text{ RH}$). Mittauskammioissa valmiina olleet liuokset todettiin laitteeseen teipattujen suola-annospussien eräkooditarrojen ja visuaalisen tarkastelun perusteella kelpoiksi, koska jokaisessa kammiossa oli enintään 1 cm suolaliuosta ja pohjalla oli kerros liukenematonta suolaa. Kalibrointi suoritettiin Tampereen teknillisen yliopiston vakio-olosuhdehuoneessa, johon oli säädetty huoneilman lämpötilaksi $+20^\circ \text{C}$ ja suhteelliseksi kosteudeksi $50 \% \text{ RH}$.



Kuva 5.18 Vaisalan mittalaitteiden kalibrointi. 1.Mittauskammio (MgCl_2) 2.Mittauskammio (NaCl) 3.Mittauskammio (K_2SO_4) 4.Lasilämpömittari 5.Tiivis kuljetuskansi 6.Rei'itetty mittauskansi 7.Mittauskannen tulpat 8.Kalibroitava HMP44 mittapää, josta on irrotettu anturien suojuus ja suodatin 9.HMI41 näyttölaite 10.Kalibroitavasta mittapäästä irrotettu anturien suojuus ja suodatin. 11.Kalibraattorin pohjalevy.

Kaikki kalibroinnissa tarvittavat laitteet ja suolaliuokset tuotiin vakio-olosuhdehuoneeseen tasaantumaan vuorokautta ennen kalibroinnin aloitusta. Kalibroinnissa olosuhteiden annettiin tasaantua mittauskammiossa aina 30 minuuttia ennen referenssipisteen tallennusta. HMK15 käyttöohjeessa tasaantumisajaksi määritettiin 10...40 minuuttia, joten valittu 30 minuuttia on riittävä.

Mittapäiden referenssipisteet on nimetty merkinnöillä offset (DRY) ja gain (WET). Offset referenssipiste määritettiin magnesiumkloridikammiossa (noin 33,1 % RH) ja gain referenssipiste kaliumkloridikammiossa (noin 97,6 % RH). Kammioden lämpötila (noin +20 °C) määritettiin kosteuskalibraattorin lasilämpömittarilla. Kalibroinnissa näyttölaitteeseen syötetään Greenspanin kalibrointitaulukosta (kuva 5.19) luettu suhteellisen kosteuden arvo kyseisessä lämpötilassa, jolloin näyttölaite vertaa mitattua arvoa referenssiarvoon ja laskee mittapäälle automaattisesti uudet korjauskertoimet. Jos korjauskertoimia ei määritetä edellä kuvatulla kalibroinnilla, muistipaikan kalibrointikertoimiksi määritetään 0 (offset) ja 1 (gain), jolloin uudella tehdaskalibroidulla mittapäällä saavutetaan mitaustarkkuus ± 4 % RH.

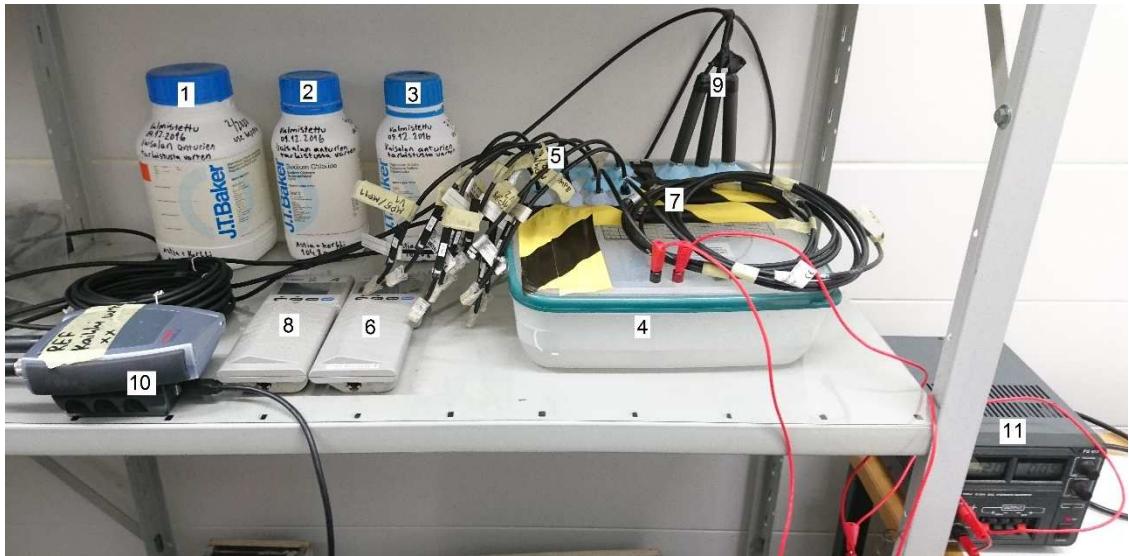
C	LiCl	MgCl ₂	NaCl	K ₂ SO ₄
0	*	33.7 \pm 0.3	75.5 \pm 0.3	98.8 \pm 1.1
5	*	33.6 \pm 0.3	75.7 \pm 0.3	98.5 \pm 0.9
10	*	33.5 \pm 0.2	75.7 \pm 0.2	98.2 \pm 0.8
15	*	33.3 \pm 0.2	75.6 \pm 0.2	97.9 \pm 0.6
20	11.3 \pm 0.3	33.1 \pm 0.2	75.5 \pm 0.1	97.6 \pm 0.5
25	11.3 \pm 0.3	32.8 \pm 0.2	75.3 \pm 0.1	97.3 \pm 0.5
30	11.3 \pm 0.2	32.4 \pm 0.1	75.1 \pm 0.1	97.0 \pm 0.4
35	11.3 \pm 0.2	32.1 \pm 0.1	74.9 \pm 0.1	96.7 \pm 0.4
40	11.2 \pm 0.2	31.6 \pm 0.1	74.7 \pm 0.1	96.4 \pm 0.4
45	11.2 \pm 0.2	31.1 \pm 0.1	74.5 \pm 0.2	96.1 \pm 0.4
50	11.1 \pm 0.2	30.5 \pm 0.1	74.4 \pm 0.2	95.8 \pm 0.5

Jos LiCl-liuosta säilytetään tai käytetään alle +18°C:n lämpötiloissa, suolaliuoksen tasapainokosteus voi muuttua pysyvästi.

Kalibrointitaulukon sarakkeissa jälkimmäinen luku osoittaa suolaliuoksen referenssikosteuden epätarkkuuden kyseisessä lämpötilassa.

Kuva 5.19 Vaisalan ohjeen mukainen Greenspanin kalibrointitaulukko (Kuva otettu Vaisalan HMK kosteuskalibraattorin käyttöohjeesta, alkuperäinen lähde Greenspan 1977).

Kalibroinnin jälkeen kaikki tutkimuksessa käytetyt Vaisalan laitteet testattiin tiivistämällä mittapäät muoviasiaan, jossa oli ionivaihdettuun veteen valmistettu Greenspanin kalibrointitaulukon mukainen kylläinen suolaliuos. Laitteet testattiin kolmessa eri kosteusolosuhteessa ja Vaisalan laitteiden mittaustuloksia verrattiin uusilla Rotronic laitteilla mitattuihin arvoihin. Testissä käytettiin magnesiumkloridi (MgCl₂), natriumkloridi (NaCl) ja kaliumsulfaatti (K₂SO₄) liuoksia. Kuvassa 5.20 on esitetty testauslaitteisto.



Kuva 5.20 Vaisalan mittalaitteiden testaus. 1.Suolaliuos (MgCl_2) 2.Suolaliuos (NaCl) 3.Suolaliuos (K_2SO_4) 4.Tiivis olosuhdeastia, jossa kaksi tuuletinta 5.Testattavat HMP44 mittapääät 6. HMI44 näyttölaite, johon on tallennettu HMP44 mittapäiden yksilölliset korjauskertoimet 7.Testattavat HMP44L mittapääät 8. HMI44 näyttölaite, johon on tallennettu HMP44L mittapäiden yksilölliset korjauskertoimet 9.Vertailumittauksiin käytetyt Rotronic HC2-S anturit ja E2-05A kaapelit 10.Vertailumittauksiin käytetty Rotronic HL-NT3 dataloggeri ja HL-DS-NT3 telakka 11.Olosuhdeastian tuulettimien virtalähde.

Testauksen perusteella tutkimukseen valittiin 8 parasta HPM44(L) mittapäättä ja niillä mitattiin lattiarakenteen suhteellista kosteutta yhteensä 24 porareistä. Tutkimuksessa käytetyt laitteet testattiin vastaavalla tavalla myös tutkimuksen päätyttyä.

5.2.4 CEM instruments laitteet

CEM Shenzhen Everbest Machinery Industry Co., Ltd on mittausvälineitä valmistava yritys, joka toimii Kiinassa ja Intiassa. Tässä tutkimuksessa käytettiin yhtiön valmistamia DT-172 Temperature and Humidity Dataloggereita (kuva 5.26), joilla pystytään mittaamaan huoneilman lämpötilaa ja suhteellista kosteutta. Kaikki tiedot perustuvat CEM Instruments tuotekortteihin ja ohjeisiin.



Kuva 5.26 DT-172 Temperature and Humidity dataloggeri (CEM Instruments).

Laite yhdistetään USB kaapelilla tietokoneeseen, jossa on Microsoft Windows käyttöjärjestelmä ja RH and Temp Datalogger -ohjelma. Laitteeseen ohjelmoidaan automaattinen mittaustulosten tallennus 1 s...24 h välein, loggaus käynnistetään laitteen painikkeilla ja laitteen muistiin mahtuu kerralla yhteensä 32700 mittaustulosta (eli 16350 RH + 16350 T). Ohjelmoinnissa määritetään myös, kuinka kauan mittausta jatketaan, mutta tallennuksen aloitusajankohtaa ei pysty määrittämään aikaan sidottuna. Laitteessa on kuitenkin kello, jonka pystyy säätämään oikeaan aikaan. Mittaustuloksia pystyy helposti tarkkailemaan laitteen näytöltä myös mittauksen aikaan ja kerätty mittaustulodata ladataan tietokoneelle CEM tallennusmuodossa (.record) tai laskentataulukossa (.xls). Tuloksia pystyy tarkastelemaan myös laitteen ohjelmistolla, jolloin tulokset nähdään suoraan kuvaajina. Laitteen virtalähteenä toimii ½ AA 3.6 V litiumparisto, jonka luvataan riittävän noin 3 vuoden mittaukseen.

Laitteen anturityypeistä ei löydy julkaistua tietoa, mutta mittaustarkkuus on esitetty tuotekortissa. Lämpötilan mittauksessa mittaustulosalue on $-40...+70\text{ °C}$, mittaustarkkuus välillä $-10...+40\text{ °C}$ on $\pm 1\text{ °C}$ ja muualla mittaustulosalueella $\pm 2\text{ °C}$. Laitteella pystytään mittaamaan suhteellista kosteutta koko alueella $0...100\text{ % RH}$. Suhteellisen kosteuden mittaustarkkuus on $\pm 3,0\text{ % RH}$ suhteellisen kosteuden ollessa välillä $40...60\text{ % RH}$, $\pm 3,5\text{ % RH}$ suhteellisen kosteuden ollessa välillä $20...40\text{ % RH}$ tai $60...80\text{ % RH}$ ja $\pm 5,0\text{ % RH}$ suhteellisen kosteuden ollessa välillä $0...20\text{ % RH}$ tai $80...100\text{ % RH}$. Laitteiden kalibroinnista tai mittaustarkkuuden pysyvyydestä ei löydy mainintoja tuotetiedoista. DT-172 laitteita oli käytössä 6 kpl kenttämittauksissa sekä 3 kpl laboratoriokokeissa. CEM loggereiden mittaustarkkuuteen ja käyttöön liittyvät ominaisuudet on esitetty taulukossa 5.1.

5.2.5 Tutkimuksessa käytettyjen RH/T mittalaitteiden vertailu

Taulukko 5.1 Tutkimuksessa käytettyjen RH/T mittalaitteiden vertailu.

Mittalaitteisto Ominaisuus	Rotronic (HL-NT3+ 3*E205A/S+ 3*HC2-S)	Wiiste (SolidRH SH1 + SolidRH RD1)	Vaisala (HMI41+ HMP44(L))	CEM (DT-172)
Kosteusanturi- tyyppi	Kapasitiivinen Polymeeri, HygroMer IN-1	Kapasitiivinen Polymeeri, ei tuotenimeä	Kapasitiivinen polymeeri, Humicap 180	Ei tiedossa, ei tuotenimeä
RH toiminta-alue [%RH]	0...100	0...100	0...100	0...100
RH mitta-alue [%RH]	0...100	10...100	0...100	0...100
RH mittaustark- kuus [%RH]	HygroMer IN-1 ±1,0 (23°C) HC2-S ±0,8 (10...30°C)	SolidRH SH1 ±2,5 (23°C, 0...80 %RH) ±2,5...4,0 (23°C, 80...100 %RH)	Humicap 180 ±1,0 HMP44+HMI41 ±2,0 (20°C, 0...90 %RH) ±3,0 (20°C, 90...100 %RH)	±3,0 (40...60 %RH) ±3,5 (20...40 %RH ja 60...80 %RH) ±5,0 (0...20 %RH ja 80...100 %RH)
Anturin hystereesi [%RH]	< 0,5	< 1,0	Sisältyy mittaustarkkuuteen	Ei tiedossa
Anturin lineaari- suusvirhe [%RH]	-	< 1,0	Sisältyy mittaustarkkuuteen	Ei tiedossa
Toistettavuus [%RH]	±0,3	±0,3	Sisältyy mittaustarkkuuteen	Ei tiedossa
Pitkäaikainen sta- bilitaetti [%RH/vuosi]	< 1,0	< 0,5	< 1,0	Ei tiedossa
RH Elementin vasteaika [s]	< 15	< 4	15	Ei tiedossa
Lämpötila-anturi- tyyppi	Pt100 (IEC class A)	PTAT	Pt1000 (IEC 751 ½ class B)	Ei tiedossa
T toiminta-alue [°C]	-100...+200	-40...+125	-40...+60	-40...+70
T mitta-alue [°C]	-50...+100	-0...+60	-20...+60	-40...+70
T mittaustarkkuus [°C]	±0,1 (10...30°C)	±0,2 (0...60°C)	±0,4 (20°C)	±1,0 (-10...+40°C) ±2,0 (-40...-10°C ja 40...70°C)
Toistettavuus [°C]	±0,05	±0,1	Sisältyy mittaustarkkuuteen	Ei tiedossa
Pitkäaikainen sta- bilitaetti [°C/vuosi]	< 0,1	< 0,05	Ei tiedossa	Ei tiedossa
T Elementin vas- teaika [s]	4	< 5	Ei tiedossa	Ei tiedossa
Käyttö tässä tutki- muksessa	Huoneolosuhteiden mitta- us ja automaattitallennus 15 minuutin välein	Huokosilman suhteellisen kosteuden mitta- us manuaalisesti luettuna	Huokosilman suhteellisen kosteuden mitta- us manuaalisesti luettuna	Huoneolosuhteiden mitta- us ja automaattitallennus 15 minuutin välein

5.2.6 Kapasitanssineulaparit

Kokeellisena menetelmänä tutkimuksen laboratorio- ja kenttämittauksissa seurattiin materiaalin kapasitanssin muutosta kosteuspitoisuuden laskiessa. Kapasitiivisissa kosteusantureissa ilman vesihöyrymolekyylit sitoutuvat hygroskooppiseen väliaineeseen, jolloin väliainekappaleen kapasitanssi muuttuu. Samoin muuttuvat myös huokoisen ja hygroskooppisen rakennusmateriaalin sähköiset ominaisuudet, joskin muutosten välisiä riippuvuuksia ei yleisesti tunneta ainakaan Knauf LM80 lattiamassan osalta.

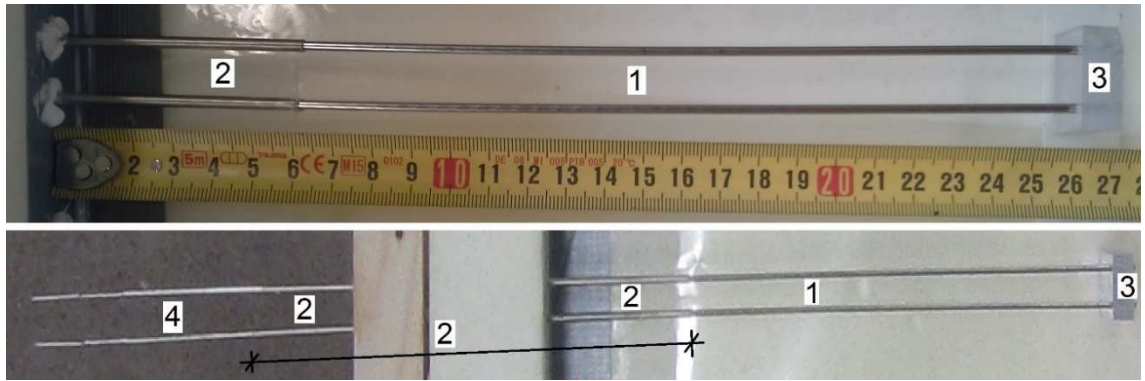
Tutkimuksessa kapasitanssineulapareja sijoiteltiin samoille syvyyksille ja kohdille huokosilman suhteellista kosteutta mittaavien anturien kanssa. Näin saatiin kerättyä kattavasti mittaustuloksia kapasitanssin ja huokosilman suhteellisen kosteuden välisestä riippuvuudesta. Mahdollisesti myöhemmin, jos Knauf LM80 lattiamassan kosteuspitoisuuden ja huokosilman suhteellisen kosteuden välinen riippuvuus selvitetään sorptiokäyrien määrittämisen yhteydessä, myös kapasitanssin ja kosteuspitoisuuden välille voidaan muodostaa odotusarvo. Tämän odotusarvon toteutuminen voidaan tarkistaa punnitus-kuivaus -menetelmällä koekappaleista joiden kapasitanssin muutosta seurataan vastaavasti kuin tässä tutkimuksessa.

Lähdeaineistossa (Roels *et al.* 2004 s.9, Hautala & Peltonen 1999 s.260, Voss *et al.* 2016 s.4) kapasitanssin mittauksessa käytetyt elektrodit ovat olleet johdinlevyjä (levy-kondensaattori, kuva 4.6). Johdinlevyjen tulee olla samansuuntaisen, jolloin myös johtimen pinnoille muodostuvat sähkökentät ovat toisiaan kohti ja levykondensaattorille kehitetyt laskentakaavat ovat voimassa.

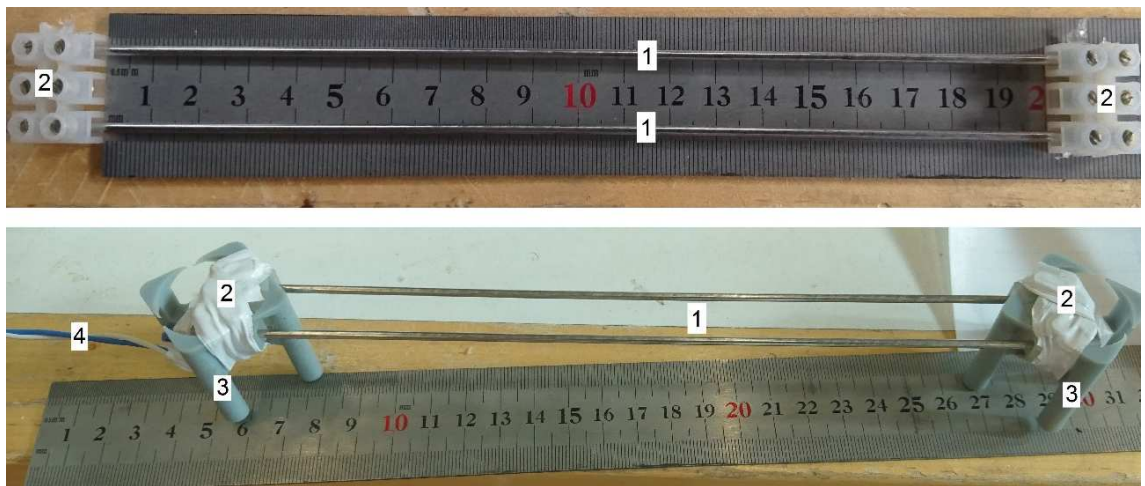
Tässä tutkimuksessa käytetyt kapasitanssineulat valmistettiin kuitenkin 2,4 mm teräslangasta, joten levykondensaattorin teoria ei ole voimassa. Näin ollen esimerkiksi materiaalin suhteellista permittiivisyyttä ei pystytä määrittämään kaavan 4.2 perusteella.

Kapasitanssineulojen valmistusmateriaaliksi valittiin TIG-hitsaukseen tarkoitettu ruostumaton ja haponkestävä hitsauslanka OK Tigrod 316LSi Ø2,4 mm, jonka tyypillinen koostumus on <0,3%C-<0,3%Cu-0,8%Si-1,8%Mn-2,8%Mo-12%Ni-18%Cr->64%Fe. Kapasitanssineulapareihin lohdinelektrodin pituudeksi määritettiin ja niiden väliseksi etäisyydeksi 15 mm langan keskilinjasta mitattuna. Laboratoriokoekappaleissa kapasitanssineulaparit kiinnitettiin suoraan valumuottiin (kuva 5.27) ja kenttäkohteisiin valmistettiin vapaasti sijoiteltavat kapasitanssineulaparit (kuva 5.28).

Laboratoriokokeissa kapasitanssin suuruus mitattiin suoraan elektrodien päistä, kun taas kenttäkokeissa käytettiin noin 1 m pituisia johtimia. Laboratoriokoekappaleisiin asennetuissa kapasitanssineuloissa paljaan elektrodin pituus rajattiin 200 mm:iin kirkkaalla kuitisteletkulla.



Kuva 5.27 Laboratoriokoekappaleissa käytetyn kapasitanssineulaparin rakenne. 1.Elektrodit (paljaat johdinlangat) $L=200$ mm, 15 mm etäisyydellä toisistaan 2.Kutisteletkulla eristetty osuus kapasitanssineulasta 3.Akryylilevystä valmistettu tuki, jolla kapasitanssineulojen väli vakioitiin 15 mm:iin ja päät tuettiin muotin pohjaan 4.Eristämättömät mitauspäät.



Kuva 5.28 Kenttämittauksissa käytetyn kapasitanssineulaparin rakenne. 1.Elektrodit (paljaat johdinlangat) $L=200$ mm, 15 mm etäisyydellä toisistaan 2.KytKentärima, jolla kapasitanssineulojen väli vakioitiin 15 mm:iin 3.Raudoituskoroke, jolla kapasitanssineulaparin asennuskorkeus vakioitiin 4.Johtimet ($L=1000$ mm) mahdollistivat kapasitanssineulaparin vapaan sijoittelun työmaalla.

Kapastianssin suuruutta mitattiin Agilent U1701A kapasitanssimittarilla (kuva 5.29). Agilent U1701A kapasitanssimittarissa on yhdeksänportainen asteikko, jossa mittausalueen pystyy valitsemaan väliltä 0,1 pF...0,1 mF. Koska mittausalue ei ole jatkuva, kaikilla mittauskerroilla laitteella ei saatu luettavia mittaustuloksia. Laitte antaa ilmoituksen OL (Over Load), jos mitattavan kapasitanssin suuruus ylittää mittausalueen ja toisaalta näyttää nollaa, jos mittausalueen alaraja ei täyty. Tähän varmasti osaltaan vaikuttaa myös kapasitanssineulaparin muodostaman sähkökentän epämääräisyys. Laitteen mittaustarkuus eri mittausalueilla on esitetty kuvassa 5.30.

Laitetta pystytään käyttämään, jos ilman lämpötila on välillä 0...50 °C ja suhteellinen kosteus enintään 80 % RH. Lämpötila-alueella 0...18 °C ja 28...50 °C kapasitanssin mittaustarkkuus heikkenee arvon 0,1*(ilmoitettu mittaustarkkuus) verran jokaista optimialueesta poikettua astetta kohden. (Agilent)



Kuva 5.29 Agilent U1701A kapasitanssimittari.

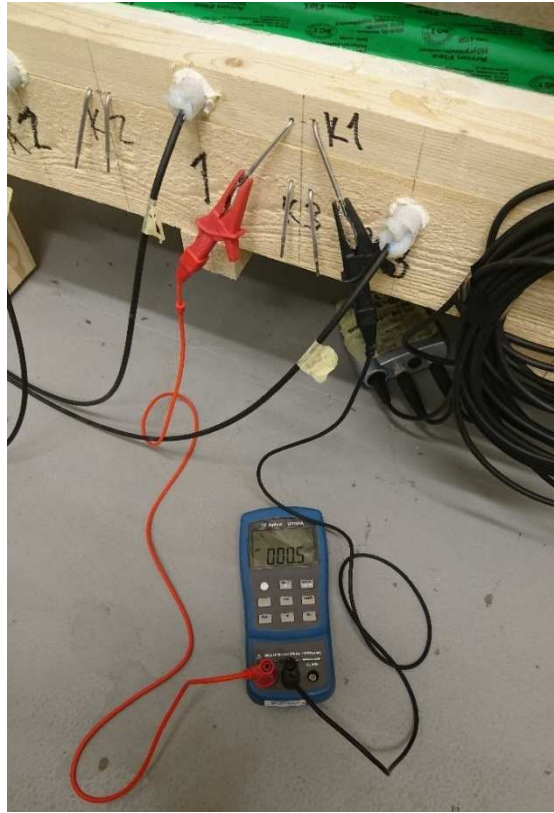
Range	Resolution	Accuracy*	Measuring rate as full scale (approx.)
1000.0 pF	0.1 pF	1% + 10	5 times/s
10.000 nF	0.001 nF	1% + 5	5 times/s
100.00 nF	0.01 nF	0.5% + 3	5 times/s
1000.0 nF	0.1 nF		5 times/s
10.000 μ F	0.001 μ F		5 times/s
100.00 μ F	0.01 μ F		5 times/s
1000.0 μ F	0.1 μ F		0.86 times/s
10.000 mF	0.001 mF	1% + 5	0.13 times/s
199.99 mF	0.1 mF	2% + 5	0.006 times/s

* The accuracy is specified to measure film capacitor or better, and use relative mode to zero residual first.

Kuva 5.30 Agilent U1701A kapasitanssimittarin mittaustarkkuus (Agilent)

Kapasitanssineulaparit luettiin liittämällä johtimet kapasitanssineulojen päihin tai neula-parin johtimiin kuvassa 5.29 näkyvillä liittimillä siten, etteivät johtimet ristenneet keskenään. Mittaustuloksissa havaittiin voimakasta huojuntaa etenkin kosteuspitoisuuden ollessa korkea, joten mittaustuloksen annettiin tasaantua aina niin kauan, että mittaustulos oli luettavissa. Tasaantumisaika korkeissa kosteuksissa oli muutamia minuutteja ja matala-

lissa kosteuksissa alle minuutin. Kuvassa 5.31 on esitetty kapasitanssineulojen luku. Laboratoriotutkimuksessa seurattavia kapasitanssineulapareja oli 48 ja kenttätutkimuksissa 30.



Kuva 5.31 Kapasitanssineulaparin mittaustuloksen luku.

6. KOEJÄRJESTELYT

Tutkimussuunnitelmassa määriteltiin, että projektin tarkoituksena on tutkia Knauf LM80 lattiamassan kuivumista. Ensisijaiseksi tutkimusmenetelmäksi oli määritetty seurantatutkimus, jossa rakennekoekappaleiden kuivumista seurataan jatkuvatoimisilla lämpötilaa ja suhteellista kosteutta mittaavilla antureilla eri syvyyksiltä. Samalla oli selvitettävä myös erilaisten olosuhteiden ja lattialämmityksen vaikutus rakennekoekappaleiden kuivumiseen.

Tutkimukseen oli määritetty sisältyväksi laboratoriotutkimuksen lisäksi myös kenttäkokeita, joiden avulla varmistetaan laboratoriokoetulosten käytännön soveltuvuus sekä parannetaan tutkimustulosten luotettavuutta. Lisäksi tutkimussuunnitelmassa määritettiin, että koekappaleiden kuivumista seurataan kokeellisten mittalaitteiden kapasitanssia mittaamalla.

6.1 Laboratoriokokeet

Laboratoriokokeet oli tutkimussuunnitelmassa määritetty tehtäväksi 500 mm * 500 mm kokoisista rakennekoekappaleista, joissa valun paksuus on joko 50 mm tai 80 mm. Koekappaleet oli määritetty toteutettavaksi siten, että kuivuminen tapahtuu ainoastaan yläpinnan kautta. Osa koekappaleista oli varustettava lattialämmitystä jäljittelevällä lämmityksellä, joka oli määritetty toteutettavaksi lämmityskaapeleilla.

Lämmitetyissä koekappaleissa lämmön pääasialliseksi kulkusuunnaksi oli määritetty koekappaleen yläpinnan kautta huoneilmaan, joten koekappaleiden alapinta ja sivut oli lämpöeristettävä. Laboratoriotutkimusta varten oli määritetty valmistettavaksi yhteensä 18 koekappaletta, joissa varioidaan valun paksuutta ja lämmitystä. Jokaisesta eri variaatiosta oli valmistettava kolme rinnakkaista koekappaletta, jolloin mittaustuloksia pystytään vertaamaan toisiinsa. Rinnakkaisten koekappaleiden sarjaa kutsutaan jatkossa koesarjaksi.

Koska kuivuvassa rakenteessa sekä lämpö- että kosteusvirta oli ohjattava vain koekappaleen yläpintaan, oli koekappalemuotilla oltava riittävän suuret vesihöyryn- ja lämmönvastukset. Koekappalemuotit valmistettiin 50 mm paksusta XPS levystä, jolloin molemmat vaatimukset saadaan kerralla täyttymään. Koekappalemuotin pohjalle lisätiin vielä 0,2 mm polyeteenikalvo, johon oli helppo tehdä merkintöjä ja kiinnityksiä ja joka myös osaltaan lisää suurimman suljettavan pinnan vesihöyrynvastusta.

Koekappaleiden lämmitys toteutettiin tehdasvalmisteisilla lattialämmityskaapeleilla, joita ohjattiin erillisillä lämpötila-antureilla ja termostaateilla. Lämmityskaapelin mini-

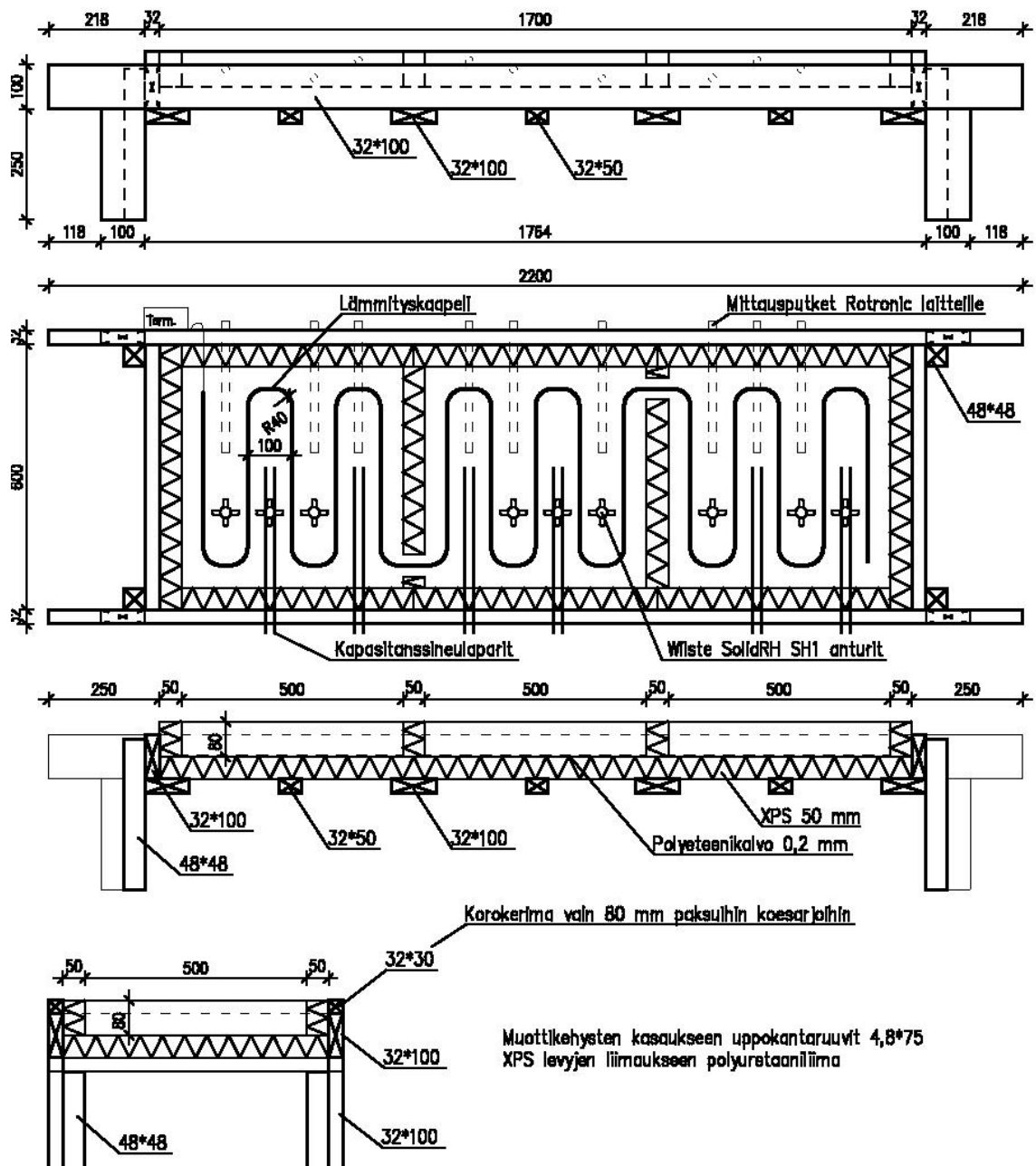
mitaivutussäde on 40 mm, joten rationaalisesti asennettuna kaapelivälin oli oltava vähintään 80 mm. Kaapeliväliksi määritettiin 100 mm, jolloin kaapelien vaikutus mittaustuloksiin saatiin mahdollisimman pieneksi. Lyhyin markkinoilla oleva varastomittainen lattialämmityskaapeli oli 7 m pituinen, mutta kaapelivälin ollessa 80...100 mm, tämän pituista kaapelia ei saa mahtumaan 500 mm * 500 mm alalle. Tästä syystä koesarjat yhdistettiin samaan muottikehykseen ja yhdellä kaapelilla lämmitettiin koko koesarjaa. Koekappaleiden välille tehtiin 50 mm leveät kannakset, joita pitkin kaapeli saatiin kuljetettua massan sisällä muotista toiseen.

Koesarjoissa, jotka piti lämmittää 50 °C lämpötilaan, oli tehontarpeen laskennan perusteella käytettävä kahta kaapelia, jotta saavutetaan varmasti riittävä lämmitysteho. Kaapelien tehontarve laskettiin mahdollisimman yksinkertaisesti määrittämällä vain lämpövirran tiheys koesarjasta huoneilmaan stationääritilanteessa. Laskennassa käytettiin Knauf LM80 lattiamassalle ilmoitetun lämmönjohtavuuden enimmäisarvoa ja muotin nurkkien tai kulmien vaikutusta ei huomioitu. Kosteuspitoisuuden vaikutus materiaalin lämmönjohtavuuteen jätettiin kokonaan huomioimatta samoin kuin veden haihtumiseen kuluva energia. Tehontarpeen laskenta on esitetty taulukossa 6.1.

Taulukko 6.1 Koesarjan 50_2 lämmitystehontarve.

LM80 kipsimassan lämmönjohtavuus λ_{LM80}	1,87	W/(mK)
XPS eristelevyn lämmönjohtavuus λ_{XPS}	0,04	W/(mK)
LM80 kipsimassan paksuus kaapelin päällä d_{LM80_y}	40,00	mm
LM80 kipsimassan paksuus kaapelin alla d_{LM80_a}	5,00	mm
LM80 kipsimassan paksuus kaapelin sivulla d_{LM80_s}	50,00	mm
XPS eristelevyn paksuus d_{XPS}	50,00	mm
Pintavastus ylöspäin $R_{si,y}$	0,10	m ² K/W
Pintavastus alaspäin $R_{si,a}$	0,17	m ² K/W
Pintavastus sivulle $R_{si,s}$	0,13	m ² K/W
Kokonaislämmonvastus ylöspäin $R_{tot,y}$	0,12	m ² K/W
Kokonaislämmonvastus alaspäin $R_{tot,a}$	1,60	m ² K/W
Kokonaislämmonvastus sivulle $R_{tot,s}$	1,59	m ² K/W
Lämmönläpäisykerroin ylöspäin U_y	8,24	W/(m ² K)
Lämmönläpäisykerroin alaspäin U_a	0,62	W/(m ² K)
Lämmönläpäisykerroin sivulle U_s	0,63	W/(m ² K)
Pinta-ala ylöspäin A_y	0,75	m ²
Pinta-ala alaspäin A_a	0,75	m ²
Pinta-ala sivulle A_s	0,20	m ²
Laatan lämpötila t_{laatta}	50,00	°C
Huoneilman lämpötila t_{huone}	20,00	°C
Lämpötilaero Δt	30,00	°C
Lämpövirta koesarjasta huoneilmaan q_{tot}	203,19	W

Kolmen koekappaleen yhdistäminen johti siihen, että 80 mm paksuiksi valettaville koesarjoille kertyy painoa yli 135 kg ja 50 mm paksuille yli 90 kg. Kuvassa 6.1 on esitetty koesarjamuotin suunnitelma. Koesarjamuotit tehtiin pääasiassa 32*100 laudasta ja 50 mm paksuisesta XPS levystä. XPS levykappaleet liimattiin toisiinsa PUR liimalla koko sauman leveydeltä ja saumat tiivistettiin teippaamalla. Muottien varustelusta kerrotaan tarkemmin seuraavassa luvussa.

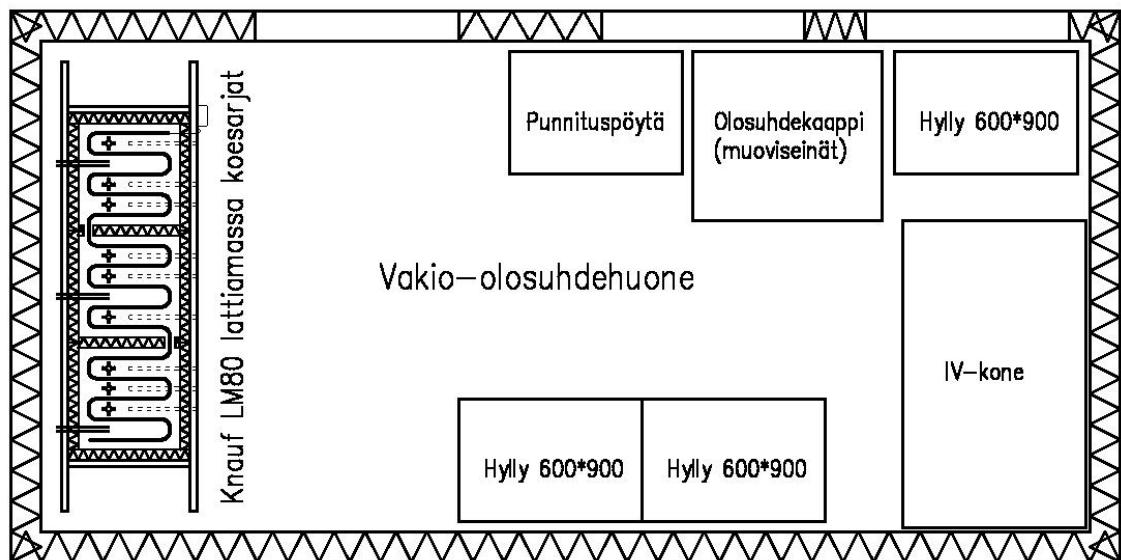


Kuva 6.1 Laboratoriokokeiden koesarjamuotti.

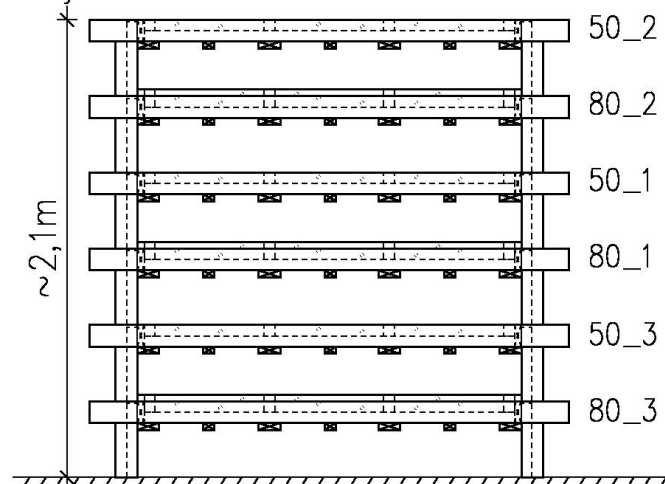
Kokeet oli määritetty toteutettavaksi Tampereen teknillisen yliopiston vakio-olosuhdehuoneissa, joissa huoneilman lämpötilaa ja suhteellista kosteutta pystytään ohjaamaan

automaattisesti. Huoneolosuhteiden lämpötilan hajonta on alle ± 1 °C ja suhteellisen kosteuden hajonta alle ± 5 % RH. Tutkimussuunnitelmassa oli määritetty huoneilman lämpötilaksi 20 °C ja suhteelliseksi kosteudeksi 50 % RH ja toteutuneita olosuhteita tuli seurata koko tutkimuksen ajan useasta eri kohdasta huonetta.

Koesarjamuottien suuri koko rajoitti muottijärjestelmän sijoittelua vakio-olosuhdehuoneisiin. Muottijärjestelmästä suunniteltiin päällekkäin koottava, jolloin kaikki koekappaleet pystyttiin sijoittamaan vakio-olosuhdehuoneen seinustalle nippuun. Kuvassa 6.2 on esitetty suunnitelma vakio-olosuhdehuoneen järjestelystä laboratoriokokeen ajaksi ja kuva muottijärjestelmästä koottuna suunnitelman mukaiseen sijoituspaikkaansa.



Koesarjat koottuna vakio-olosuhdehuoneen seinustalle



Kuva 6.2 Vakio-olosuhdehuoneen järjestely Knauf LM80 kuivumistutkimuksen ajaksi ja muottisarja koottuna sijoituspaikkaansa. Raskaat (100...140 kg) koesarjat pinottiin paikalleen käsikäyttöisellä pinoamisvaunulla (pinkkarilla).

Tutkimuksen alkaessa, tutkimustilaksi varatussa vakio-olosuhdehuoneessa oli kuitenkin käynnissä muita tutkimuksia, joten alkavan tutkimuksen oli sopeuduttava käynnissä olevien tutkimusten olosuhteisiin. Tästä syystä huoneilman lämpötila oli 23 °C ja suhteellinen kosteus 50 % RH. Muutoksen seurauksena 25 °C lämpötilaan säädettyjen koesarjojen ja huoneilman välinen lämpötilaero jäi suunniteltua pienemmäksi, mikä vaikutti osaltaan lattialämmityksen vaikutusten arviointiin.

Myöhemmin valettu koesarja 50_4 pystytettiin sijoittamaan toiseen olosuhdehuoneeseen, jossa lämpötila ja suhteellinen kosteus olivat tutkimussuunnitelman mukaiset, joten laboriotutkimukseen sisältyi myös ympäristöolosuhteiden variointi. Koesarja 50_4 valettiin erillisiin vanerimuotteihin, koska niiden ei lämmittämättöminä tarvinnut olla kiinni toisissaan. Tutkimuksessa seurattavat variaatiot on esitetty taulukossa 6.2.

Taulukko 6.2 Tutkittavat olosuhde- ja koekappaleyhdistelmät.

Koesarja	Paksuus [mm]	Lämmitys (kyllä/ei)	Lämmityksen lisätiedot
50_1	50	Kyllä	7 vrk ilman lämmitystä, sen jälkeen 25 °C jatkuva
50_2	50	Kyllä	7 vrk ilman lämmitystä, sen jälkeen 3 vrk 25 °C, loppuaika 50 °C
50_3	50	Ei	Ei lämmitystä
50_4	50	Ei	Ei lämmitystä, eri ympäristöolosuhteet, lisätty myöhemmin
80_1	80	Kyllä	7 vrk ilman lämmitystä, sen jälkeen 25 °C jatkuva
80_2	80	Kyllä	7 vrk ilman lämmitystä, sen jälkeen 3 vrk 25 °C, loppuaika 50 °C
80_3	80	Ei	Ei lämmitystä

Rakennekoekappaleet oli määritetty pinnoitettavaksi muovimatolla, kun arvostelusyvytydellä saavutetaan tavoitekosteuspitoisuudet 85, 80 ja 75 % RH. Koesarjan jokainen koekappale pinnoitetaan näin ollen eri tavoitekosteuspitoisuudessa ja eri ajan hetkellä. Arvostelusyvytydeksi oli määritetty 40 % valun paksuudesta, mikä vastaan myös kelluvalle lattiarakenteelle määritettyä arvoa (kuva 2.16). Koesarjamuottien väliin tehtiin noin 190...220 mm tila, jolloin pinnoitusta edeltävä hionta sekä pinnoitus muovimatolla pystyttiin tekemään muotteja siirtämättä.

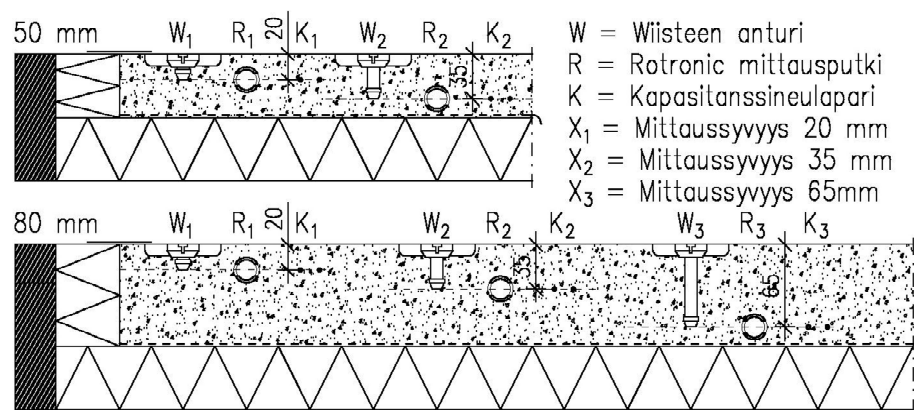
Tutkimussuunnitelmassa oli määritetty, että mittauksia jatketaan ainakin siihen asti, kunnes koekappaleet ovat saavuttaneet keskimääräisen suhteellisen kosteuden arvon noin 85 % RH. Lattialämmityksessä koekappaleissa suhteellisen kosteuden arvoa määritettäessä on otettava huomioon kipsimassan tasapainokosteuden lämpötilariippuvuus.

Knauf LM80 lattiamassan tasapainokosteutta ei kuitenkaan tunneta, joten ainoaksi vertailukelpoiseksi suureeksi jää huokosilman suhteellinen kosteus ja siitä laskettavissa oleva huokosilman vesihöyrypitoisuus. Menetelmä ei ota huomioon sitä, että materiaalin lämpötilan laskiessa osa huokosilman kosteudesta tiivistyy huokosten seinämiin ja huokosveteen, jolloin huokosilman suhteellinen kosteus ei noudata huoneilman suhteellisen kosteuden sääntöjä.

Tavoitekosteuspitoisuuden saavuttaminen todettiin kaikille koekappaleille määrittämällä niiden laskennallinen huokosilman suhteellinen kosteus arvostelusyvytydellä 20 °C lämpötilassa. Pinnoituspäättös tehtiin 50 mm koekappaleissa 20 mm syvyydellä ja 80 mm koekappaleissa 35 mm syvyydellä olevan päämittalaitteen (Rotronic) anturin mittaustuloksen perusteella. Anturilla mitatun lämpötilan perusteella laskettiin vesihöyryn kyllästysosapaine kaavan 2.12 mukaisesti. Mitatun suhteellisen kosteuden ja lasketun vesihöyryn kyllästysosapaineen perusteella määritettiin huokosilmassa vaikuttava vesihöyryn osapaine kaavalla 2.13. Laskennan tulosta verrattiin 20 °C lämpötilassa vallitsevaan vesihöyryn kyllästysosapaineeseen kaavan 2.13 mukaisesti, jolloin saatiin tavoitekosteuspitoisuuden määrittämisessä käytettävä suhteellisen kosteuden arvo.

Tavoitekosteuspitoisuuksien laskentatavasta johtuen lämmitetyt koesarjat kuivatettiin huomattavasti kuivemmaksi, kuin huokosilman suhteellisen kosteuden mittaustulosten mukainen tavoitekosteuspitoisuus määritti. Menetelmän suurimpana etuna saavutettiin pidempi häiriintymätön seuranta ennen pinnoitusta, mikä lisää vertailukelpoisten mittaustulosten määrää. Mittauksia jatkettiin vielä pinnoituksen jälkeen, jolloin saatiin tietoa pinnoituksen vaikutuksista rakenteen kosteuskäyttäytymiseen. Materiaalin kosteuspitoisuuden muutosta ei pystytty seuraamaan, koska tasapainokosteuskäyriä ei tunneta ja suoraan kosteuspitoisuutta mittaavia antureita ei ole saatavilla Knauf LM80 massalle. Tästä syystä tutkimuksessa päädyttiin seuraamaan materiaalin kapasitanssin riippuvuutta huokosilman suhteellisesta kosteudesta.

Laboratoriokokeissa huokosilman suhteellista kosteutta ja lämpötilaa mitattiin sekä valuun asennettavista mittaasputkista että materiaaliin valettavista kiinteistä antureista. Molemmat käytetyistä menetelmistä on ohjekortissa RT 14-10984 määritelty suuntaa-antaviksi, mutta laboratorio-olosuhteissa toteutettuna ja huolellisesti valmisteltuna mittaasputkista saadaan luotettavia tutkimustuloksia. Tässä tutkimuksessa käytetyt valuun asennettavat mittalaitteet olivat erityisesti tätä tarkoitusta varten kehitettyjä Wiiste SolidRH SH1 antureita, joten myös se voidaan luokitella nyt tarkaksi menetelmäksi. Mittaasputkista ja huoneilmasta tuloksia tallennettiin automaattisesti Rotronic-laitteistoilla. Laboratoriokoekappaleissa käytetyt mittaussyvytydet on esitetty kuvassa 6.3.



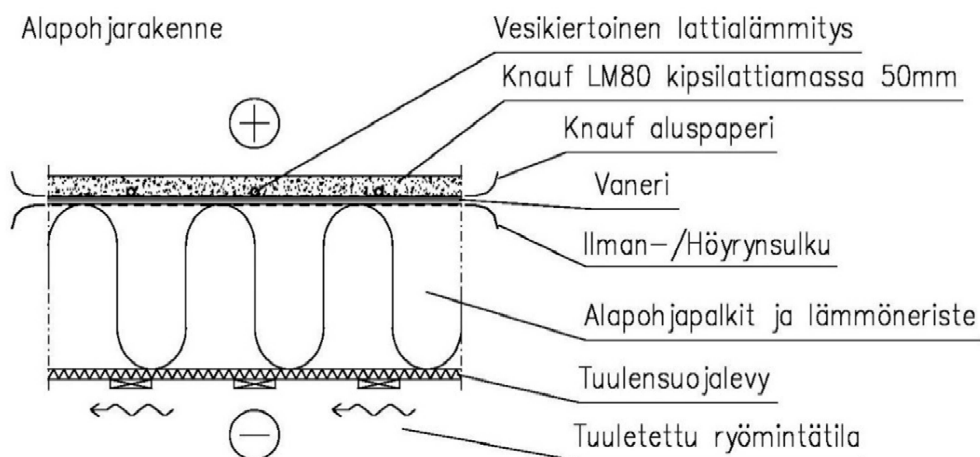
Kuva 6.3 Mittaussyvytydet laboratoriokoekappaleissa.

6.2 Kenttäkohde 1

Ensimmäinen kenttäkohde oli omakotitalon laajennus, johon valettiin noin 25 m² laatta Knauf LM80 lattiamassalla osaksi puurakenteista tuulettuvaa alapohjaa. Kohteen vaipparakenteiden lämmöneristeet, höyrynsulku ja tuulensuoja oli asennettu, mutta ikkunat ja ovet puuttuivat. Ikkuna-aukkojen yli oli asennettu 25 mm huokoinen puukuitulevy, mutta oviaukossa oli vain vaneri, joka ei ollut tiiviisti suljettu. Tästä syystä tilan olosuhteet seurasivat viiveellä syksyisen ulkoilman olosuhteita.

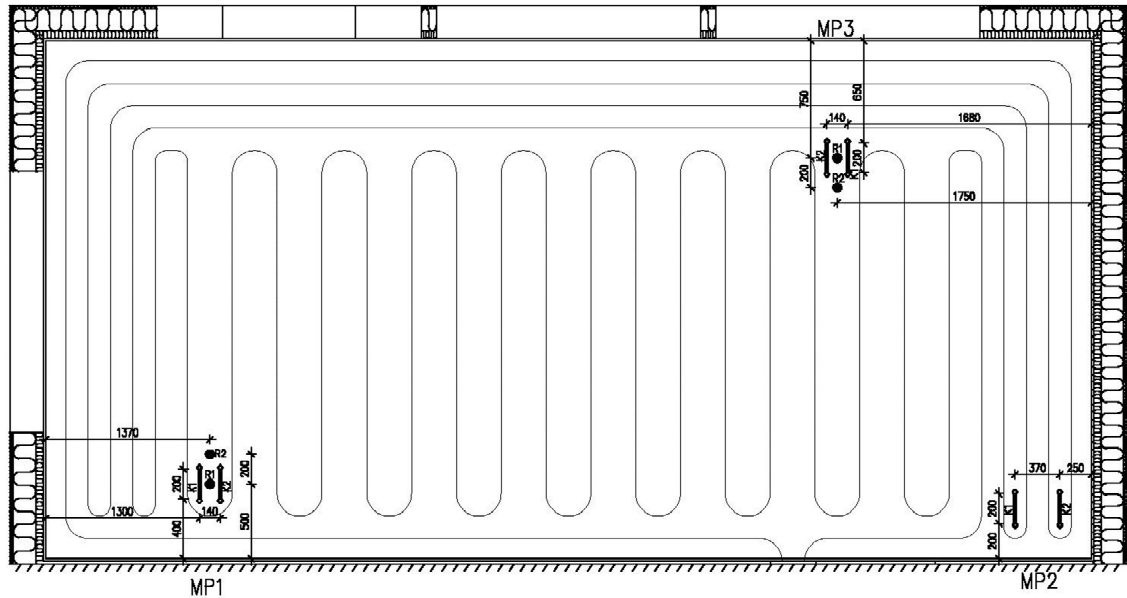
Kohteella oli vesikiertoinen lattialämmitys, jota käytettiin myös rakenteen kuivatukseen. Valun paksuus oli 50 mm ja lattiamassan pumppauksen ja tiivistyksen suoritti kyseisen materiaalin asennukseen erikoistunut urakoitsija.

Kerroksellisen alapohjarakenteen sisäpintaan asennettujen tiiviiden rakennekerrosten (Knauf aluspaperi, vaneri, ilman-/höyrynsulku) perusteella kohteen pintalaatan voidaan olettaa kuivuvan pääasiassa yhteen suuntaan ja alapuolelta eristettynä myös lämpövirta suuntautuu pääosin ylöspäin. Näin ollen kohteen rakenne vastaa periaatteiltaan laboratoriokekokappaleita ja mittaustulokset ovat vertailukelpoisia. Kuvassa 6.3 on esitetty kohteen alapohjarakenne.



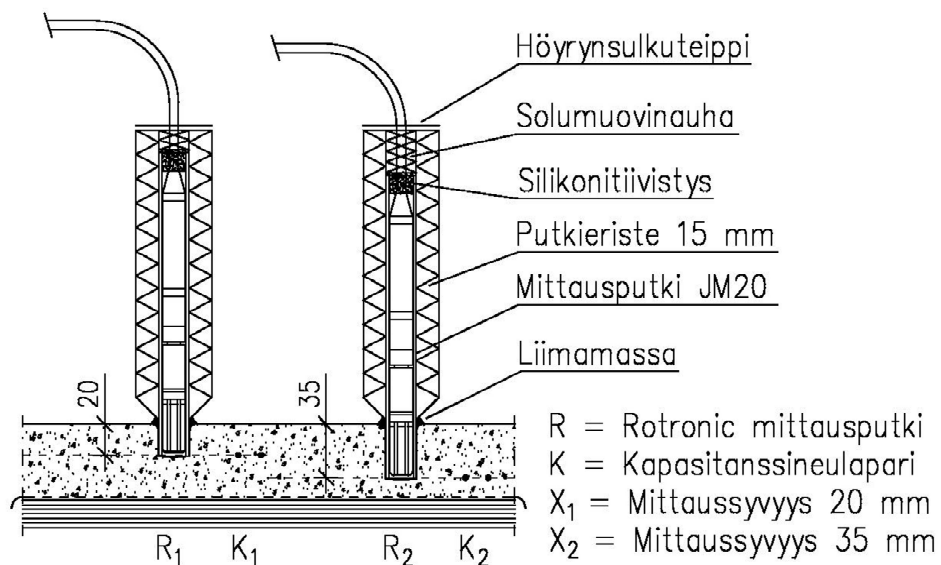
Kuva 6.3 Kenttäkohteen 1 alapohjan rakennetyyppi (periaatepiirros).

Rakenteen mittauspisteet valittiin ensisijaisesti siten, että niistä aiheutui mahdollisimman vähän haittaa rakennustyölle. Mittauspisteet sijoitettiin lattialämmityspotkien väliin ja mittausten painopistealueet olivat ulkoseinälinja sekä liitosalue laajennettavaan rakennukseen. Kuvassa 6.4 on esitetty Kenttäkohteen 1 pohjapiirustus ja mittauspisteiden sijainnit.



Kuva 6.4 Kenttäkohteen 1 pohjapiirustus ja mittauspisteiden sijainnit. Mittauspisteet sijoitettiin lattialämmitysputkien väliin. Kuvan alareunassa oleva sivu rajautuu laajennettavaan rakennukseen.

Kohteella testattiin kenttämittauksia varten kehitettyä mittausvälineistöä ennen laajempaa käyttöä kenttäkohteella 2. Porareikämittauksia varten kehitettiin lämpöeristetty mittausputki ja poraussyvyyden vakioitiin valmistamalla rajoittimet porakoneeseen. Vakioporaussyvyyksiksi määritettiin 20 mm ja 35 mm rakenteen pinnasta mitattuna. Kuvassa 6.5 on esitetty kenttäkohteella 1 käytetyn lämpöeristetyn mittausputken periaatepiirros ja mitaussyvyydet. Kapasitanssineulapareista kehitettiin kenttämittauksiin soveltuva versio, jossa elektrodien pinta-ala ja etäisyys ovat samat kuin laboratoriokoekappaleissa, mutta elektrodien päissä olevien johtimien avulla neulapari voidaan sijoittaa vapaasti.



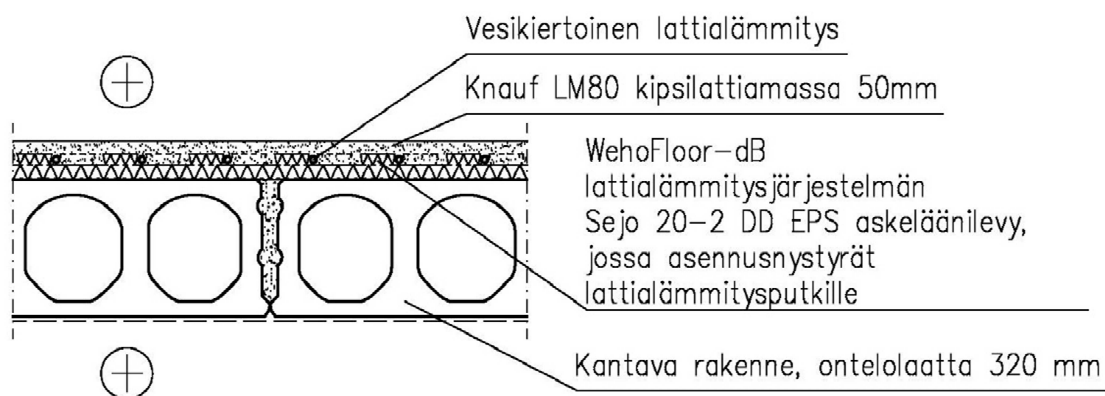
Kuva 6.5 Kenttäkohteella 1 käytetyt lämpöeristetyt mittausputket ja mitaussyvyydet. Mittausputken eriste on viistetty, ettei se vaikuttaisi rakenteen kuivumiseen.

Kohteella käytettiin lämpöeristettyjä mittausputkia, koska huoneilman lämpötila seurasi ulkoilman lämpötilaa ja lattiavalu oli lämmitetty, joten mittausputkissa oli ilmeinen kondenssiriski. Mittausputkista ja huoneilmasta tuloksia tallennettiin automaattisesti Rotronic-laitteistoilla. Lisäksi seurattiin materiaalin kapasitanssin muutosta rakenteen kuivumassa.

6.3 Kenttäkohde 2

Toinen kenttäkohde oli asuinkerrostalo, jonne valettiin Knauf LM80 lattiamassalla yhteensä noin 3400 m² pintalaattaa, kerralla valetun alan ollessa noin 680 m². Mittauksia tehtiin vain kahden ensimmäisenä valetun alueen osalla, jotka sijaitsivat kohteen 2.-5.kerroksessa.

Kohteen välipohjarakenne on esitetty kuvassa 6.6. Kohteen ulkoseinärakenteena oli teräsbetonikuorinen ja lämpöeristetty sandwich -elementti tai vaihtoehtoisesti teräsbetoninen sisäkuorielementti, jonka ulkopinnassa oli ohutrappausalustaksi soveltuva, pohjarapattu lämmöneriste. Kohteen ikkunat oli asennettu ja huoneolosuhteita hallittiin tuuletamalla sekä puhaltamalla lämmintä ilmaa kerroksiin.

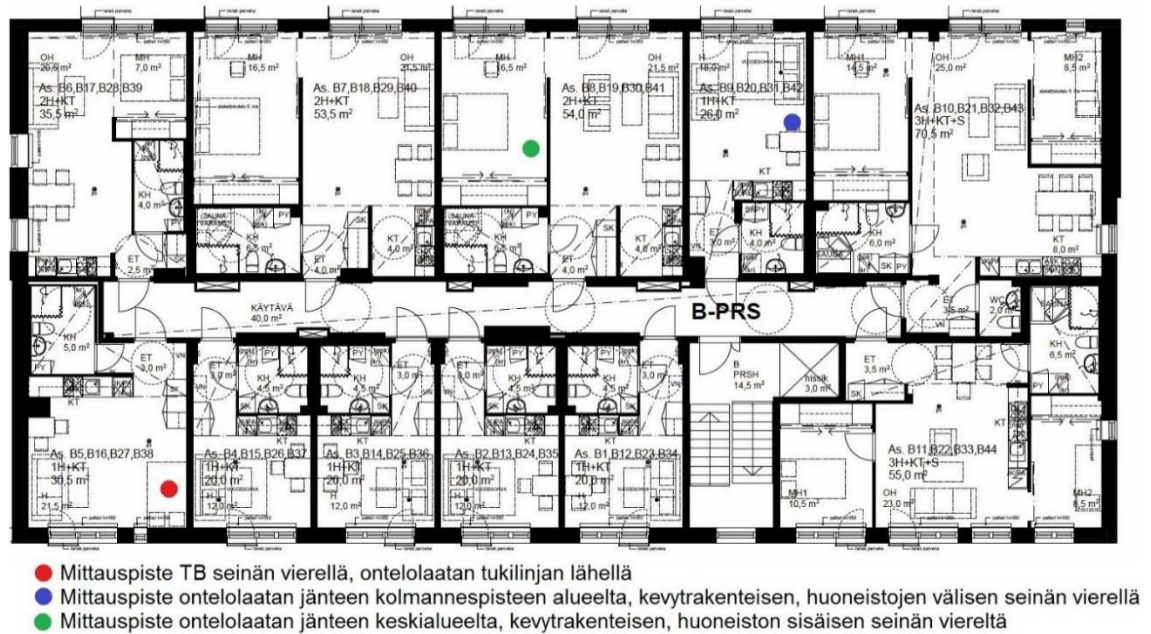


Kuva 6.6 Kenttäkohteen 2 välipohjan rakennetyyppi.

Myös tässä kohteessa oli vesikiertoinen lattialämmitys, jota käytettiin rakenteen kuivautukseen. Mittauspisteiden sijainnit valittiin luvussa 4.4 esitettyjen periaatteiden mukaisesti rakennuksen päistä ja keskialueelta. Myös ontelolaattojen esikorotukset huomioitiin mittauspisteiden sijainnissa. Mittauspisteistä yksi sijoitettiin ontelolaatan tuen lähelle, yksi laatan kolmannespisteen kohdalle ja yksi laatan puoliväliin. Mittausten päättyessä kaikki mittausreiät porattiin läpi askeläänieristeen pinnassa olevaan muovikalvoon asti ja laatan paksuus mitattiin. Mittausten perusteella valun keskimääräinen paksuus mittauspisteissä oli 55,90 mm, paksuuden vaihdellessa välillä 48...66 mm.

Mittauksista rakennustyölle aiheutuvaa haittaa pyrittiin minimoimaan sijoittamalla mittauspisteet kauas ovista ja kulkureiteistä. Kuvassa 6.7 on esitetty kenttäkohteen 2 pohja-

piirustus ja mittauspisteiden sijainnit. Mittauspisteet olivat kerroksittain samalla kohdalla. Ulkoisten olosuhteiden vaikutusta mittauksiin pyrittiin vähentämään sijoittamalla mittauspisteet kauas tuuletusikkunoista sekä suoran auringon paisteen ulottumattomiin. Lattiamassan pumppauksen ja tiivistyksen suoritti kyseisen materiaalin asennukseen erikoistunut urakoitsija.

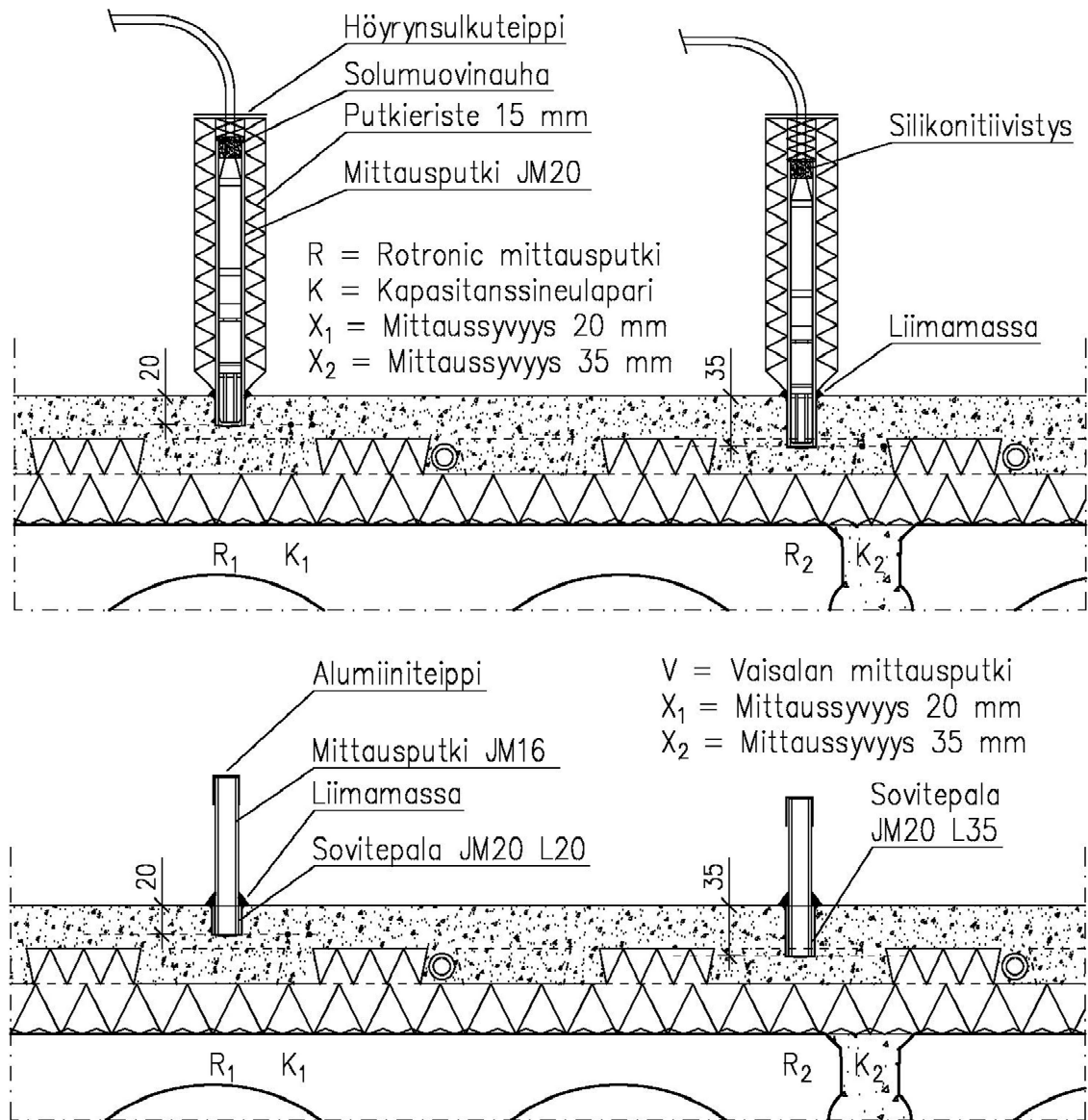


Kaikki mittauspisteet vähintään 500 mm väliseinästä ja vähintään 1000 mm ulkoseinästä

Kuva 6.7 Kenttäkohteen 2 pohjapiirustus ja mittauspisteiden sijainnit. Mittauspisteiden sijoittelussa huomioitiin ontelolaattojen esikorotukset sekä tulevat taipumat, ulkoilman vaikutus ja kulkureitit. Lisäksi pyrittiin minimoimaan työlle aiheutuva häiriö.

Tämän tutkimuksen mittauksissa ei määritetty kantavan ontelolaattarakenteen kosteuspiitoisuutta eikä myöskään eristekerroksen kosteuspiitoisuutta seurattu. Koko rakenteen kosteusmittauksissa kyseiset arvot on lähteen (Merikallio 2016 s.27) mukaan määritettävä, mutta nyt mittaukset kohdistettiin pelkästään pintavalun kuivumiseen. Rakenteessa käytetyn askeläänieristelevyn yläpinnassa on kova ja tiivis muovikalvo, joten rakenteen voidaan olettaa kuivuvan vain ylöspäin. Myös lämpövirta suuntautuu pääosin huoneilmaan päin, koska askeläänieriste koostuu pääosin paisutetusta polystyreenistä (EPS).

Myös toisella kenttäkohteella mittausmenetelmänä käytettiin porareikämittausta. Ensimmäisesti rakenteen kuivumista seurattiin lämpöeristetyistä mittausputkista Rotronic-laitteistoilla. Vertailutuloksia kerättiin Vaisalan laitteilla porareikämittauksina eristämättömistä mittausputkista, kun havaittiin, että huoneolosuhteet tai tuuletus eivät aiheuttaneet kondenssiriskiä mittauspisteissä tässä kohteessa. Myös kapasitanssin muutosta seurattiin koko tutkimuksen ajan vastaavilla kapasitanssineulapareilla kuin ensimmäisessä kenttäkohteessa. Kuvassa 6.8 on esitetty kenttäkohteella 2 käytetyt mittausputket ja -syvyyydet.



Kuva 6.5 Kenttäkohteella 2 käytetyt lämpöeristetyt mittausputket, lämpöeristämättömät mittausputket ja mittaussyvyudet. Porattavat reiät pyrittiin sijoittamaan mahdollisimman kauas askeläänieristeen nystyröistä sekä lattialämmitysputkista.

7. KOKEIDEN SUORITUS

Tutkimuksessa Knauf LM80 lattiamassan kuivumista seurattiin edellisessä luvussa kuvatuilla laboratoriokokeilla ja kenttätutkimuksilla. Laboratoriokokeet aloitettiin elokuun 2016 alussa ja ne kestivät helmikuun 2017 loppuun saakka. Kenttäkohde 1 aloitettiin elokuun 2016 lopussa ja kohdetta seurattiin lokakuun 2016 alkuun. Tutkimuksen toinen kenttäkohde aloitettiin marraskuun 2016 alussa ja kohdetta seurattiin tammikuun 2017 alkupäiviin asti.

7.1 Laboratoriokokeet

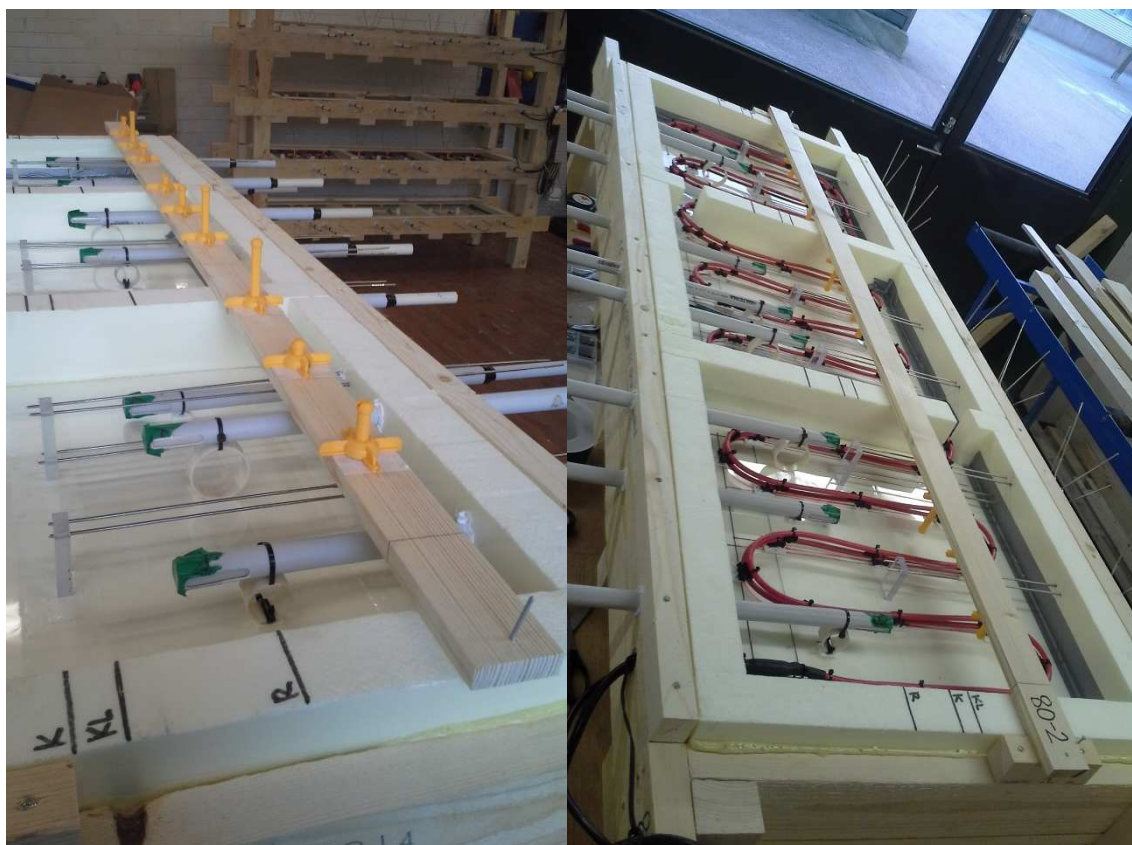
Laboratoriokoesarjoille rakennettiin valmistuskuvan 6.1 mukaiset siirrettävät ja pinottavat muotit. Kuvassa 7.1 on esitetty koesarjamuotit valmiina valua varten



Kuva 7.1 Koesarjamuotit pinottuna.

Lämmitettäviin koesarjoihin asennettiin mittalaitteiden lisäksi lämmityskaapelit ja lämmityksen termostaattia ohjaavat lämpötila-anturit. Lämmitykseen käytettiin 7 m pituisia Ensto Tassu1 (150W) kaapeleita kaikissa lämmitettävissä koesarjoissa ja näiden lisäksi 7,3 m pituisia DEVI Deviflex DTIP-18 (135W) kaapeleita koesarjoissa 50_2 ja 80_2. Lämmityksen ohjaukseen käytettiin CAL Controls LTD:n valmistamia CAL EDT1411 termostaatteja ja CAL E-NTC-APT-1.5T7 termoparilämpötila-antureita. Anturin mitaustarkkuus on $\pm 0,3$ °C ja termostaatin säätötarkkuus ± 1 °C. Koesarjojen lämpötilan määrittämisessä hyödynnettiin kuitenkin ensisijaisesti Rotronic mittalaitteiden näyttämiä lämpötilalukemia ja termostaatin näyttämä säädettiin yleensä tavoitearvoa korkeammaksi. Säädetty lämpötila säilytti asetusarvonsa melko hyvin.

Muottivarusteiden paikallaan pysyminen varmistettiin kiinnittämällä ne muotin pohjamuoviin nippusideankkureilla ja kaksipuoleisella teipillä. Mittausputket ja kapasitanssineulat tuettiin muottien reunoihin ja niiden vapaat päät tuettiin muotin pohjaan muovikorkeilla (kuva 7.2).



Kuva 7.2 Mittalaitteiden, lämmityskaapelien ja muottivarusteiden asennus. Mittausputkien päät tuettiin muotin pohjaan jäykällä muoviputkilla, kapasitanssineulojen vapaat päät tuettiin akryylimuovikappaleilla ja kaikki varusteet kiinnitettiin pohjamuoviin kaksipuoleisella teipillä tai tarrapohjaisilla nippusideankkureilla. Wiisteen anturit kiinnitettiin asennuslistaan kaksipuoleisella teipillä, joten lista pystyttiin helposti irrottamaan antureista valun jälkeen. Asennuslistan avulla anturit saatiin helposti oikeille paikoille.

Laboratoriokoeosuuteen kuului myös materiaalikoe-kappaleiden valmistus myöhemmin tehtäviä materiaalikokeita varten. Osa materiaalikoe-kappaleista valmistettiin aiemmissa tutkimuksissa käytettyihin koekappalemuotteihin. Näin valmistettujen lieriökoekappaleiden halkaisija on 185 mm ja paksuus 15 mm tai 30 mm. Ohuempia koekappaleita valmistettiin 9 kappaletta ja paksumpia 15 kappaletta.

Materiaalikoe-kappaleiden myöhempää valmistusta varten valettiin päästään suljettuihin muoviputkiin koekappaleaihiot, joista pystytään myöhemmin sahaamaan sopivia koekappaleita. Jokaiseen muoviputkimuottiin asennettiin lisäksi 3 kapasitanssineulaparia, joten myöhemmin sahattavista koekappaleista pystytään mittaamaan myös kapasitanssia.

Koekappaleaihioita valettiin 50 mm putkeen 3 kappaletta (á 0,7 m) ja 185 mm putkeen 2 kappaletta (á 0,7 m). Kuvassa 7.3 on esitetty materiaalikoe-kappalemuotit. Materiaalikoe-kappaleet valettiin samassa tilassa ja samaan aikaan, kuin tämän tutkimuksen koesarjat. Materiaalikoe-kappaleet ja koekappaleaihiot myös vietiin valua seuraavana päivänä samaan vakio-olosuhdehuoneeseen kuin koesarjat, joten koekappaleiden kuivumisolosuhteet tunnetaan. Suurimmista, halkaisijaltaan 185 mm, koekappalemuoteista irrotettiin vaneriset pohjalevyt vakio-olosuhdehuoneessa, joten ne ovat pystyneet kuivumaan vapaasti molemmista päistään.



Kuva 7.3 Materiaalikoe-kappaleet.

Myöhemmin valmistettiin vielä vertailukoesarjan 50_4 valua varten erilliset vanerimuotit, jotka varusteltiin kapasitanssineulapareilla ja mittausputkillä. Vanerimuotit valmistettiin 50 mm korkeiksi, niiden pohjalle asennettiin 0,2 mm polyeteenikalvo ja kaikki saumat tiivistettiin liimamassalla. Kuvassa 7.4 on esitetty koesarjan 50_4 koekappalemuotit.



***Kuva 7.4** Koesarjan 50_4 koekappalemuotit.*

Laboratoriokoekappaleiden valmistukseen käytettävä LM80 lattiamassa toimitettiin tutkimuspaikalle 04.07.2016. Massaa toimitettiin 30 kg säkeissä yhteensä 690 kg ja se varastoitui ohjeiden mukaisesti kuivissa olosuhteissa. Ensimmäisestä toimituksesta laastijauhetta jäi yli 1 säkki, joka käytettiin koesarjan 50_4 valuun yhdessä myöhemmin (28.09.2026) toimitetun laastisäkin kanssa.

7.1.1 Mittalaitteiden asennus

Muotteihin asennettiin kapasitanssineulaparit ja mittausputket Rotronic laitteille suunnitelmien mukaisesti. Mittaussyvyyydet kaikilla mittalaitteilla olivat 20 mm ja 35 mm kaikissa koesarjoissa ja 80 mm paksuissa koekappaleissa kuivumista seurattiin lisäksi 65 mm syvyydeltä tulevan valun pinnasta.

Taulukossa 7.1 on esitetty kootusti eri koekappaleiden mittaussyvyyydet ja käytettyjen mittalaitteiden tunnuksset.

Taulukko 7.1 Laboratoriokoekappaleiden mittaussyvyydet ja mittalaitteiden tunnuukset.

Koekappale	-R1 (20 mm)	-R2 (35 mm)	-R3 (65 mm)	-W1 (20 mm)	-W2 (35 mm)	-W3 (65 mm)	-K1 (20 mm)	-K2 (35 mm)	-K3 (65 mm)
50_1_1	X	X	-	X	X	-	X	X	-
50_1_2	X	X	-	X	X	-	X	X	-
50_1_3	X	X	-	X	X	-	X	X	-
50_2_1	X	X	-	X	X	-	X	X	-
50_2_2	X	X	-	X	X	-	X	X	-
50_2_3	X	X	-	X	X	-	X	X	-
50_3_1	X	X	-	X	X	-	X	X	-
50_3_2	X	X	-	X	X	-	X	X	-
50_3_3	X	X	-	X	X	-	X	X	-
50_4_1	X	X	-	-	-	-	X	X	-
50_4_2	X	X	-	-	-	-	X	X	-
50_4_3	X	X	-	-	-	-	X	X	-
80_1_1	X	X	X	X	X	X	X	X	X
80_1_2	X	X	X	X	X	X	X	X	X
80_1_3	X	X	X	X	X	X	X	X	X
80_1_1	X	X	X	X	X	X	X	X	X
80_1_2	X	X	X	X	X	X	X	X	X
80_1_3	X	X	X	X	X	X	X	X	X
80_1_1	X	X	X	X	X	X	X	X	X
80_1_2	X	X	X	X	X	X	X	X	X
80_1_3	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Taulukossa käytetyt merkinnät: -R1 = Rotronic anturin mittausputki 20 mm syvyydellä pinnasta, -W2 = Wiisteen anturi 35 mm syvyydellä pinnasta, -K3 = Kapasitanssineulapari 65 mm syvyydellä pinnasta, 50_1_1 = 50 mm koesarja_lämmitys 25 °C_Koekappale 1, 50_2_2 = 50 mm koesarja_lämmitys 25/50 °C_Koekappale 2, 80_3_3 = 80 mm koesarja_ei lämmitystä_koekappale 3, jne.. Merkinnät on havainnollistettu kuvassa 6.3.

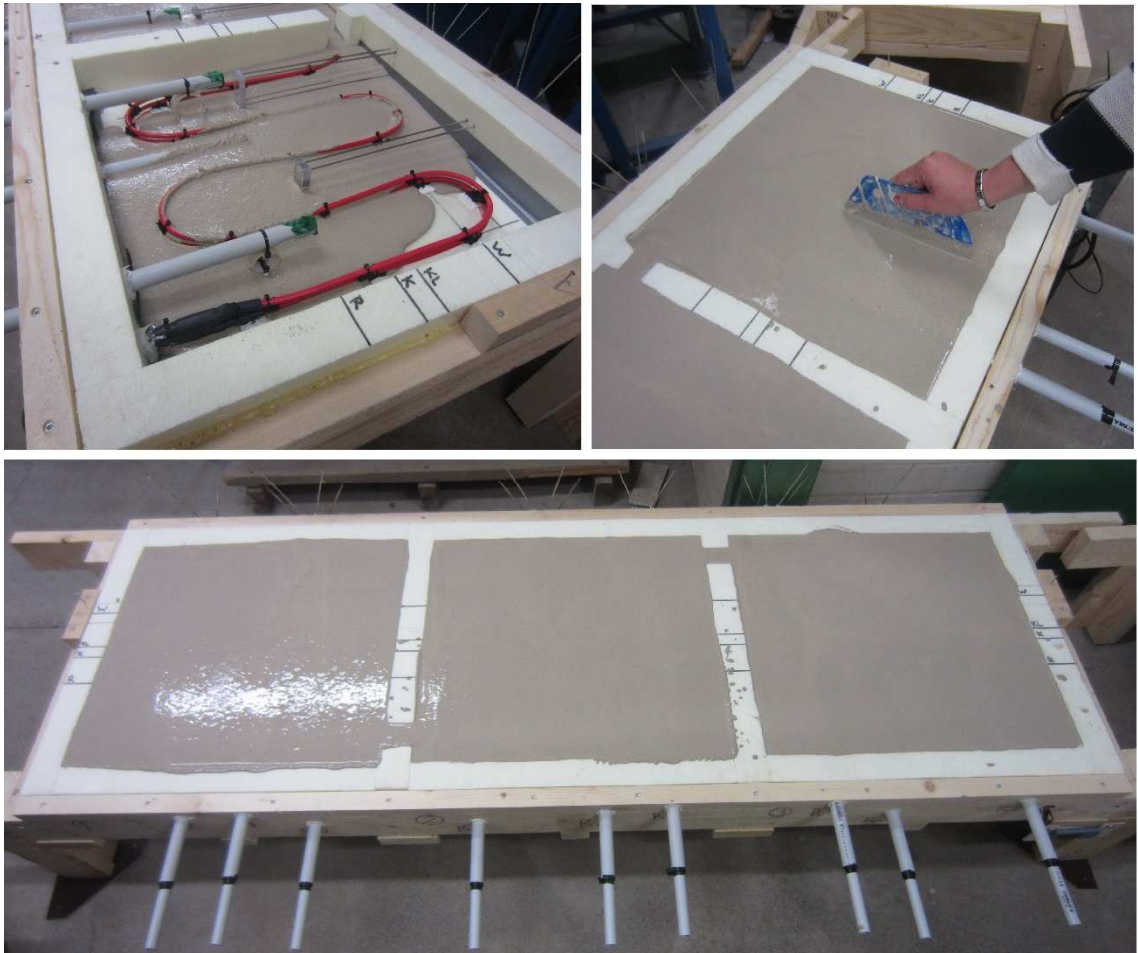
7.1.2 Valu

Koesarjamuotit sijoitettiin valutilaan ($\theta \approx 20$ °C ja $\phi \approx 50$ % RH) ja muotit oikaistiin vaakasuoraan vesivaa'an avulla. Koesarjat 50_1, 50_2, 50_3, 80_1, 80_2 ja 80_3 valettiin 02.08.2016 13:30-15:30 välisenä aikana. Massan valmistukseen käytettiin Tampereen vesilaitoksen hanavettä massan valmistusohjeen mukaisesti 4,65 l jokaista 30 kg säkkiä kohden. Massa sekoitettiin laastipaljussa porakonevispilällä 1 säkki kerrallaan ja sen koostumuksen kelpoisuus varmistettiin ensimmäisestä sekoitetusta massaerästä Knaufin ohjeen mukaisella leviämäkokeella (kuva 7.5).



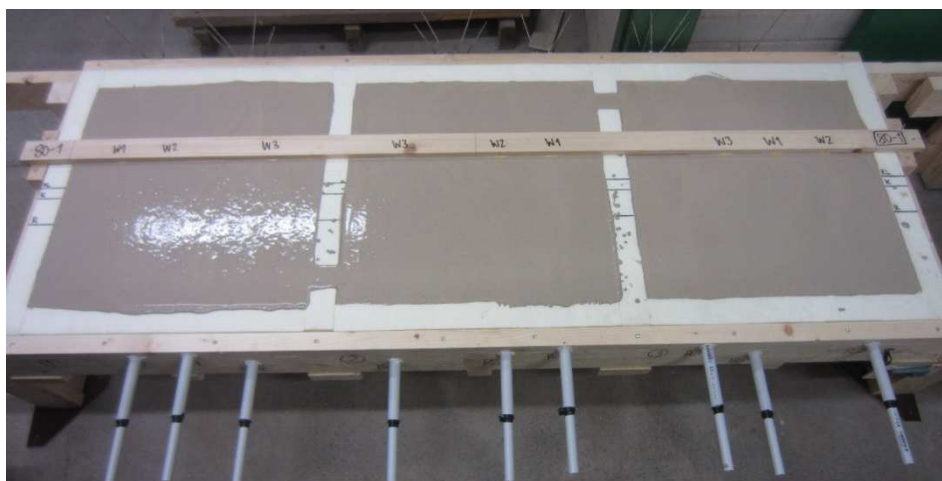
Kuva 7.5 Laboratoriokoekappaleiden valussa käytetyn massan leviämäko-
keessa 1,3 litraa valmista massaa saa levitä enintään 42 cm halkaisijaltaan olevalle
alalle. Tutkimuskoekappaleissa käytetyn massan leviämä oli 38 cm.

Valmistettu massa kaadettiin paljasta suoraan muottiin, koesarjamuotit valettiin täyteen
jatkuvana valuna ja valun tiivistys aloitettiin välittömästi, kun massa oli kaadettu muottiin
(kuva 7.6). Tiivistykseen käytettiin muovilastaa ja tiivistettäessä myös massan pinta ta-
soittui vaakasuoraksi.



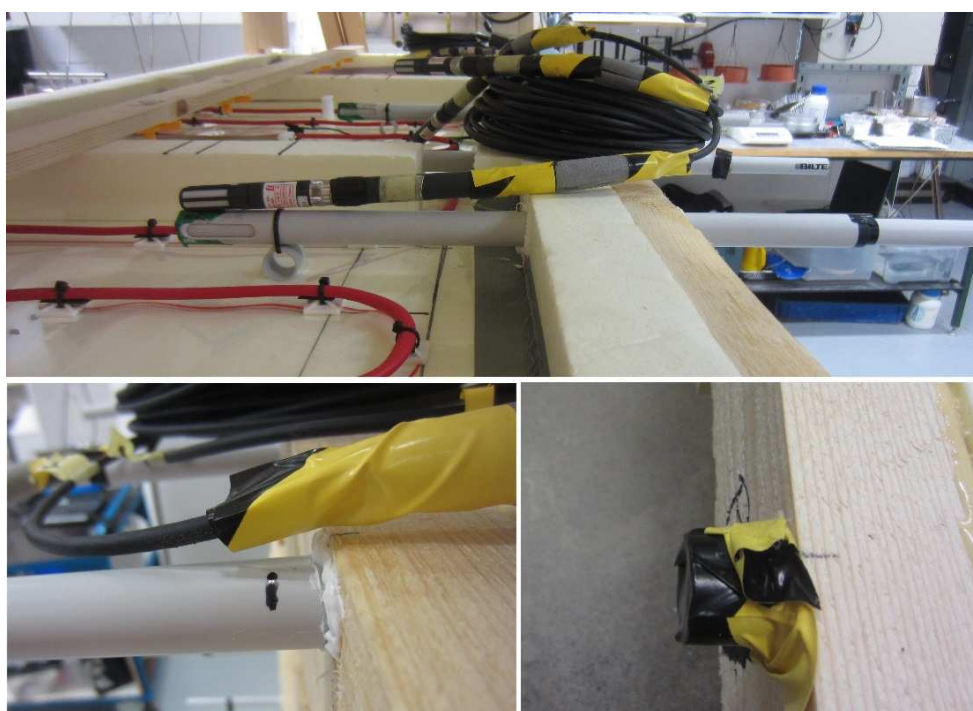
Kuva 7.6 Laboratoriokoekappaleet valettiin koesarja kerrallaan valmiiksi asti. Massan
tiivistys aloitettiin heti, kun massa oli kaadettu muottiin.

Tiivistettyyn ja tasoitettuun massaan painettiin vielä Wiisteen anturit, jotka oli kiinnitetty asennuslistaan oikean asemoinnin varmistamiseksi (kuva 7.7). Koekappaleet jätettiin valutilaan sitoutumaan seuraavaan aamuun saakka.



Kuva 7.7 Wiisteen anturien asennus.

Valua seuraavana aamuna mittausputkien sisäputket poistettiin. Putket katkaistiin 20 mm muotin pinnan ulkopuolelta, jolloin putket pystyttiin teippaamaan tiiviisti kuivumisen alkuvaiheessa. Heti katkaisun jälkeen putket teipattiin muoviteipillä, mutta myöhemmin tiivistykseen vaihdettiin höyrynsulkuteippi. Mittausputken vapaan ilmatilan vähentämiseksi, anturin taakse jäävä ilmatila täytettiin solumuovinauhalla, joka toimii samalla myös lämpöeristeenä. Kuvassa 7.8 on esitetty mittausputken katkaisupituuden ja täytteeksi tulevan solumuovinauhan pituuden määrittäminen.



Kuva 7.8 Mittausputkien katkaisupituuden ja solumuovitäytteen pituuden määrittäminen.

Putkien katkaisun ja väliaikaisen tiivistyksen jälkeen koesarjat siirrettiin vakio-olosuhte-huoneeseen, kuvassa 6.2 esitetyn suunnitelman mukaisesti (kuva 7.9). Koekappaleiden reunat teipattiin höyrynsulkuteipillä, jolloin koekappale ei pääse kuivumaan muotin reu-nan kautta.

Samalla myös mittausputket imuroitiin mittausputkeen mahtuvalla suulakkeella ja put-kien päät teipattiin huolellisesti höyrynsulkuteipillä. Ylimmän koesarjan päälle lisättiin vielä kattolevy ja kaikkien koesarjojen yläpuolelle tuulettimet, jolloin kuivumisolosuhteet olivat mahdollisimman tasaiset koesarjojen välillä.

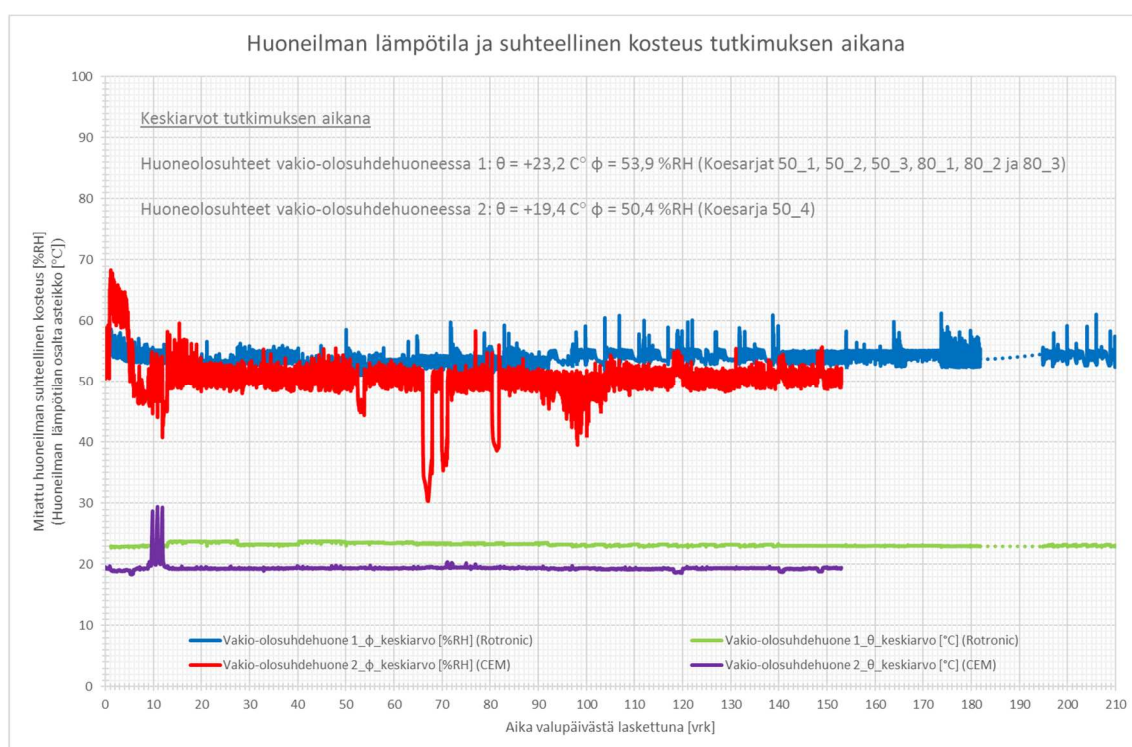


Kuva 7.9 Koesarjamuotit vakio-olosuhte-huoneessa. Kuivumisen alkuvaiheessa anturit asennettiin vain pinnassa oleviin mittausputkiin. Syvemmällä olevia mittausputkia ryh-dyttiin seuraamaan, kun pintaputkista saatiin alle 100 % RH lukemia. Ennen antureiden asennusta mittausputket oli suljettu tiiviisti höyrynsulkuteipillä. Myös koekappaleiden reunat teipattiin höyrynsulkuteipillä.

7.1.3 Kuivumisen seuranta vakio-olosuhteissa

Tallentavat mittaukset aloitettiin Rotronic mittalaitteilla 02.08.2016 klo 12:00 ja tallenusväliksi asetettiin 15 minuuttia. Vakio-olosuhdehuoneiden suhteellista kosteutta ja lämpötilaa seurattiin aktiivisesti koko tutkimuksen ajan ja tarvittaessa olosuhteita korjattiin, jos poikkeamia havaittiin.

Vakio-olosuhdehuoneessa 1, jossa pääosa laboratoriokokeista tehtiin, olosuhteita seurattiin pinottujen koesarjojen ylä- ja alareunasta sekä keskialueelta tallentavalla Rotronic-laitteistolla. Toisessa vakio-olosuhdehuoneessa seurattiin koesarjan 50_4 kuivumista ja siellä olosuhteita tallennettiin CEM loggereilla koekappalemuottien päältä. Kuvassa 7.10 on esitetty huoneilman lämpötila ja suhteellinen kosteus kummassakin vakio-olosuhdehuoneessa tutkimuksen aikana.



Kuva 7.10 Huoneilman lämpötila ja suhteellinen kosteus vakio-olosuhdehuoneissa 1 ja 2. Pisteviivalla merkityltä aikaväliltä ei ole mittaustuloksia. Vakio-olosuhdehuoneessa 2 tapahtui tutkimuksen alkuvaiheessa laitehäiriö, joka ajoittui viikonlopulle. Tästä syystä lämpötila on hetkellisesti käynyt jopa 30 °C:ssa. Samoin laitteistohäiriöstä johtuen suhteellisen kosteuden arvot putosivat muutamaa otteeseen huomattavan mataliksi koesarjan 50_4 seurannan aikana. Kuvaajat on esitetty myös tämän tutkimuksen liitteessä.

Valun ja kovettumisvaiheen aikana mittalaitteet olivat valutilassa pakattuna avoimeen muovilaatikkoon, joten valutilan olosuhteita pystyttiin seuraamaan (kuva 7.11). Wiisteen mittalaitteet oli testattu jo antureiden nimeämisen ja asennussuunnitelman teon yhtey-

dessä. Kaikki Wiisteen anturit luettiin ensimmäisen kerran heti valun jälkeen. Kapasitanssineulat luettiin ensimmäistä kertaa valua seuraavana päivänä, kun koesarjat oli siirretty vakio-olosuhdehuoneeseen.



Kuva 7.11 Mittausten aloitus valutilassa. Rotronic-laitteet aloittivat tallennuksen 2 tuntia ennen valua ja ne siirrettiin koesarjojen mukana valutilasta vakio-olosuhdehuoneeseen. Wiisteen anturit luettiin ensimmäisen kerran heti valun jälkeen, kun kaikki asennuslistat oli painettu märkään massaan.

Kuivumisen seurannan alkuvaiheessa kapasitanssineulat ja Wiisteen anturit luettiin päivittäin ja suhteellisen kosteuden kehitystä mittausputkissa seurattiin aktiivisesti. Mittausputkiin ei heti alussa voitu asentaa antureita, koska anturien vaurioituminen on hyvin todennäköistä, jos ne joutuvat olemaan ääriolosuhteissa pitkiä aikoja.

Ensimmäisten päivien ja viikkojen aikana antureiden annettiin tasaantua höyrynsulkuteipillä tiivistetyissä mittausputkissa muutamien tuntien ajan. Jos tasaantumisen jälkeen anturin näyttämä oli 100 % RH tai lähelle tätä, anturi poistettiin ja mittausputki suljettiin taas höyrynsulkuteipillä. Ennako-odotusten mukaisesti jatkuvat mittaukset pystyttiin aloittamaan ensimmäisenä 50 mm koekappaleista, lähimpänä koekappaleen pintaa olevista mittausputkista. Jatkuvan mittauksen alkaessa mittausputki suljettiin silikonitiivitsyksellä, joka ulotettiin noin 10...15 mm mittausputken sisään (kuva 7.12).



Kuva 7.12 Anturit tiivistettiin mittausputkiin silikonilla, kun havaittiin, että huokosilman suhteellinen kosteus mittausputkessa alkaa laskea alle 100 % RH.

Alkuvaiheen aikana muutamia antureita vaurioitui liian suuren kosteusrasituksen seurauksena. Lisäksi 80 mm paksuihin koekappaleisiin vaihdettiin uusia antureita mittaustulosten oltua pitkiä aikoja lähes 100 % RH.

Jatkuvia mittauksia jatkettiin 15 minuutin tallennusvälillä koko tutkimuksen ajan. Ensimmäisten viikkojen ajan kaikki mittalaitteet luettiin ja tarkistettiin päivittäin. Kun suunnitelman mukaiset lämmityksen muutokset oli tehty ja kuivumisen kehitys alkoi muiltakin osin vakiintua, aktiivista seurantaa vähennettiin ensin 2-3 kertaan viikossa ja lopulta laitteet luettiin ja tarkastettiin kerran viikossa. Jatkuvien mittausten aloitus- ja lopetuspäivämäärät sekä vaurioituneiden tai epäluotettaviksi epäiltyjen anturien vaihtopäivät on esitetty taulukossa 7.2.

Taulukko 7.2a Rotronic mittausten aloitus ja lopetuspäivät 50 mm koekappaleissa.

Koekappale	Anturi tiivistetty mittauputkeen	Anturi pois mittauputkesta	Huomiot
50_1_1-R1	05.08.2016	29.11.2016	-
50_1_1-R2	11.08.2016	29.11.2016	-
50_1_2-R1	11.08.2016	29.11.2016	-
50_1_2-R2	11.08.2016	29.11.2016	-
50_1_3-R1	11.08.2016	29.11.2016	-
50_1_3-R2	11.08.2016	29.11.2016	-
50_2_1-R1	05.08.2016	29.11.2016	-
50_2_1-R2	11.08.2016	29.11.2016	-
50_2_2-R1	11.08.2016	29.11.2016	Anturi vaihdettu uuteen 18.08.2016
50_2_2-R2	11.08.2016	29.11.2016	-
50_2_3-R1	11.08.2016	29.11.2016	-
50_2_3-R2	11.08.2016	29.11.2016	-
50_3_1-R1	05.08.2016	29.11.2016	-
50_3_1-R2	11.08.2016	29.11.2016	-
50_3_2-R1	11.08.2016	29.11.2016	-
50_3_2-R2	11.08.2016	29.11.2016	-
50_3_3-R1	11.08.2016	29.11.2016	-
50_3_3-R2	11.08.2016	29.11.2016	-
50_4_1-R1	11.10.2016	28.02.2017	Valettu 28.09.2016
50_4_1-R2	11.10.2016	28.02.2017	Valettu 28.09.2016
50_4_2-R1	11.10.2016	28.02.2017	Valettu 28.09.2016
50_4_2-R2	11.10.2016	28.02.2017	Valettu 28.09.2016
50_4_3-R1	11.10.2016	28.02.2017	Valettu 28.09.2016
50_4_3-R2	11.10.2016	28.02.2017	Valettu 28.09.2016

Taulukko 7.2b Rotronic mittausten aloitus ja lopetuspäivät 80 mm koekappaleissa.

Koekappale	Anturi tiivistetty mitta-putkeen	Anturi pois mitta-putkesta	Huomiot
80_1_1-R1	05.08.2016	28.02.2017	Anturi vaihdettu uuteen 07.09.2016 ja 15.09.2016
80_1_1-R2	18.08.2016	28.02.2017	Anturi vaihdettu uuteen 07.09.2016 ja 15.09.2016
80_1_1-R3	18.08.2016	28.02.2017	Anturi vaihdettu uuteen 07.09.2016 ja 15.09.2016
80_1_2-R1	11.08.2016	28.02.2017	Anturi vaihdettu uuteen 07.09.2016
80_1_2-R2	18.08.2016	28.02.2017	Anturi vaihdettu uuteen 07.09.2016
80_1_2-R3	18.08.2016	28.02.2017	Anturi vaihdettu uuteen 06.09.2016
80_1_3-R1	11.08.2016	28.02.2017	Anturi vaihdettu uuteen 07.09.2016
80_1_3-R2	18.08.2016	28.02.2017	Anturi vaihdettu uuteen 07.09.2016
80_1_3-R3	18.08.2016	28.02.2017	Anturi vaihdettu uuteen 07.09.2016
80_2_1-R1	05.08.2016	29.11.2016	-
80_2_1-R2	18.08.2016	29.11.2016	-
80_2_1-R3	18.08.2016	29.11.2016	-
80_2_2-R1	11.08.2016	29.11.2016	-
80_2_2-R2	18.08.2016	29.11.2016	-
80_2_2-R3	18.08.2016	29.11.2016	-
80_2_3-R1	11.08.2016	29.11.2016	Loggeri vaihdettu 15.09.2016, anturit samat kuin alussa
80_2_3-R2	18.08.2016	29.11.2016	Loggeri vaihdettu 15.09.2016, anturit samat kuin alussa
80_2_3-R3	18.08.2016	29.11.2016	Loggeri vaihdettu 15.09.2016, anturit samat kuin alussa
80_3_1-R1	05.08.2016	28.02.2017	Anturi vaihdettu uuteen 07.09.2016
80_3_1-R2	18.08.2016	28.02.2017	Anturi vaihdettu uuteen 07.09.2016
80_3_1-R3	18.08.2016	28.02.2017	Anturi vaihdettu uuteen 07.09.2016
80_3_2-R1	11.08.2016	28.02.2017	Anturi vaihdettu uuteen 07.09.2016
80_3_2-R2	18.08.2016	28.02.2017	Anturi vaihdettu uuteen 07.09.2016
80_3_2-R3	18.08.2016	28.02.2017	Anturi vaihdettu uuteen 07.09.2016
80_3_3-R1	11.08.2016	28.02.2017	Anturi vaihdettu uuteen 07.09.2016
80_3_3-R2	18.08.2016	28.02.2017	Anturi vaihdettu uuteen 07.09.2016
80_3_3-R3	18.08.2016	28.02.2017	Anturi vaihdettu uuteen 07.09.2016

Suurin osa koesarjoista valettiin 03.08.2016, mutta koesarja 50_4 vasta 28.09.2016. Taulukosta nähdään, että pintaputkiin antureita päästiin asentamaan kahden vuorokauden kuluttua valusta. Lämpimämmässä vakio-olosuhdehuoneessa 50 mm paksuihin koekappaleisiin kaikki anturit saatiin asennettua 8 vuorokautta valun jälkeen ja viileämmässä vakio-olosuhdehuoneessa 13 vuorokauden kuluttua valusta. 80 mm koekappaleisiin loput anturit asennettiin 15 vuorokauden kuluttua valusta. Paksummissa koekappaleissa kuitenkin mitatut suhteellisen kosteuden arvot olivat pitkän aikaa 100 % RH tai lähelle, joten osa antureista vaurioitui. Tulosten luotettavuuden varmistamiseksi kaikki anturit vaihdettiin uusiin syyskuun alussa.

7.1.4 Koekappaleiden pinnoitus

Koekappaleet oli määritetty pinnoitettavaksi muovimatolla, kun tutkimussuunnitelman mukaiset tavoitekosteuspitoisuudet 85 % RH, 80 % RH ja 75 % RH saavutettiin. Koekappaleiden lämpötilat oli määritetty pidettäväksi vakiona alkuvaiheen säätöjen jälkeen, joten pinnoitus tehtiin koekappaleiden ollessa vakiolämpötilassa 23 °C, 25 °C tai 50 °C. Yleensä lattialämmitys on sammutettava ennen pinnoitusta ja tavoitekosteuspitoisuuden täytyminen varmistetaan normaaliin käyttölämpötilaan jäähtyneestä laatasta.

Ennen pinnoitusta koekappaleen pinta hiottiin epäkeskohiomakoneella, jossa oli karkeudeltaan 40 oleva hiomapaperi. Hiottu koekappale imuroitiin huolellisesti ja puhdistetulle pinnalle levitettiin muovikammalla kerros Kiilto M1000 ECO lattia- ja seinäliimaa. Liiman riittoisuudeksi on ilmoitettu 4...6 m²/litra eli 0,17...0,25 litraa/m². Liimaa levitettiin kuvassa 7.13 esitetyllä tavalla koko koekappaleen alalle, mutta jälkeen päin tarkasteltuna liimakerroksen paksuus on tullut ohjearvoa suuremmaksi, koska tutkimuksen päättyessä liimaa oli kulunut noin 2 litraa 4,5 m² alalle eli 0,44 litraa/m². Pinnoitettavia koekappaleita oli 18 kappaletta ja ne pinnoitettiin 12 eri kerralla, joten osa liimasta on mennyt hukkaan työvälineiden puhdistuksen yhteydessä ja todellinen yliliimaus on jäänyt hieman pienemmäksi.

Pinnoitukseen käytettiin asuintiloihin tarkoitettua Upofloor Upostep 20 joustovinyylimattoa. Kyseessä on joustovinyylimuovimatto, jonka pinnan kulutuskerroksena on polyuretaanikalvo ja pohjarakenteena lasikuituverkolla vahvistettu vaahto. Maton kokonaispaksuus on 2,4 mm ja paino noin 1,6 kg/m². Samaa mattoa oli käytetty Elina Paukun diplomityöhön liittyvässä tutkimuksessa 1999.

Paukku oli tutkimuksessaan määrittänyt kosteusolosuhteista riippuen kyseisen muovimaton vesihöyrynläpäisevyydeksi ($\delta_{v, \text{muovimatto}}$) $0,0124...0,732 \cdot 10^{-6}$ m²/s ja vesihöyryn vastukseksi ($Z_{v, \text{muovimatto}}$) $157...262 \cdot 10^3$ s/m. Vertailuarvoja muovimaton ominaisuuksille voidaan määrittää koekappaleen muiden pintojen vesihöyrynläpäisevyysominaisuuksista. Koekappalemuotin pohjalla on 0,2 mm polyeteeni kalvo ja muotti on rakennettu 50 mm XPS levystä. Lähteessä (Vinha 2014 s.406 ja s.416) on taulukoitu kyseisten rakennusmateriaalien ominaisuuksia. Polyeteenikalvon (0,2 mm) vesihöyrynvastukseksi (Z_v) mainitaan $730...3700 \cdot 10^3$ s/m ja 50 mm XPS levyn $39...280 \cdot 10^3$ s/m. Vesihöyrynvastuksia vertaamalla voidaan todeta, että kosteusvirran ensisijainen reitti huoneilmaan on yläpinnan kautta myös pinnoituksen jälkeen.

Matosta leikattiin 500 mm * 500 mm kokoiset palat, jotka asennettiin märkäliimausmenetelmällä koekappaleen päälle. Maton reunat teipattiin höyrynsulkuteipillä, jolloin koekappale ei pääse kuivumaan maton reunan kautta. Kuvassa 7.13 on esitetty koekappaleen pinnoituksen vaiheet. Mahdollisimman pitkän häiriintymättömän mittausdatan keräämiseksi, koesarjaa 50_4 ei pinnoitettu.



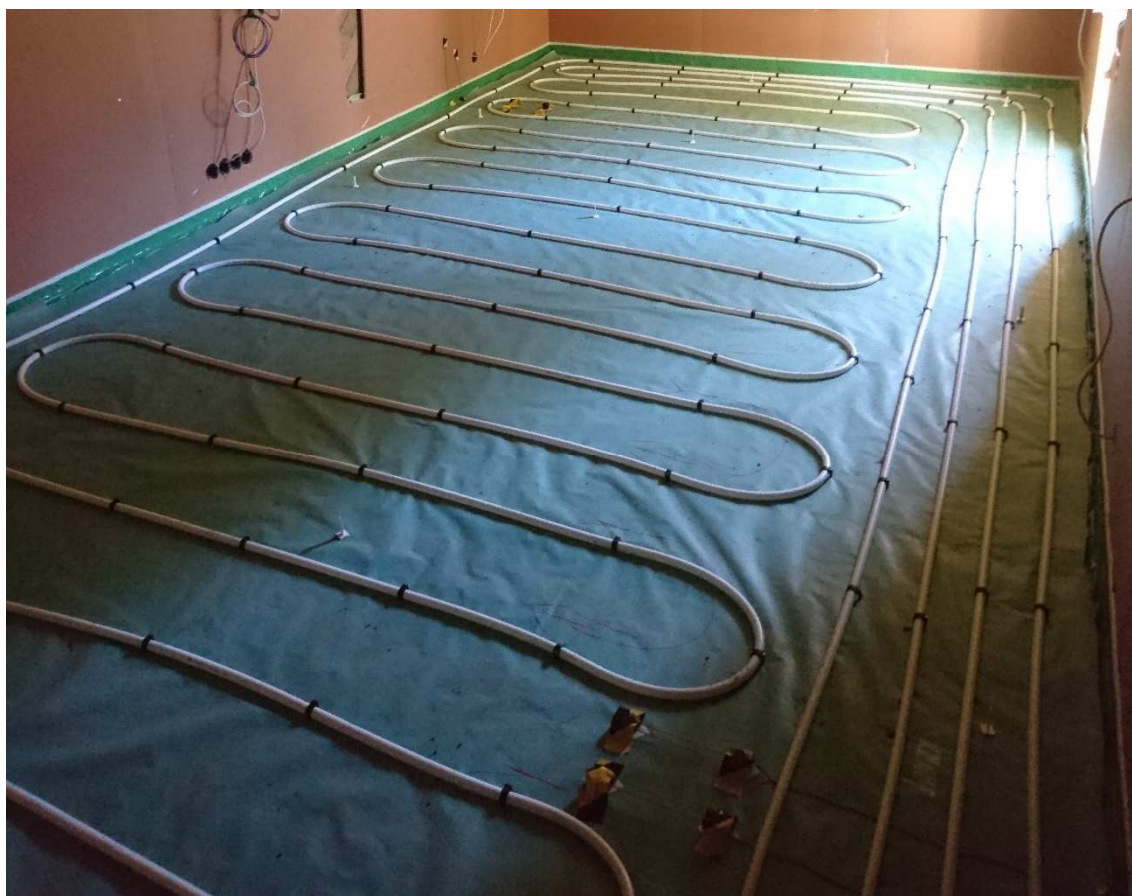
Kuva 7.13 Koekappaleen pinnoitus. Koekappaleen pinta hiottiin ja imuroitiin. Puhtaalle pinnalle levitettiin lattialiimaa muovikammalla ja päälle asennettiin muovimatto. Muovimaton reunat teipattiin höyrynsulkuteipillä heti liimauksen jälkeen.

7.1.5 Kuivumisen jälkiseuranta

Koekappaleiden pinnoitusajankohdat vaihtelivat koesarjojen sisällä sekä erityisesti koesarjojen välillä. Rakenteen kosteuspuiteisuuden muutosta seurattiin aiemman järjestelyn mukaisesti myös pinnoitusten jälkeen. Ensimmäisenä pinnoitettuja koesarjoja seurattiin vielä 8 viikkoa koesarjan viimeisen pinnoituksen jälkeen. Tästä jälkiseuranta-ajasta lämmitettyjen koekappaleiden lämpötila pidettiin tasaisena 6 viikon ajan, jonka jälkeen lämmitys kytkettiin pois päältä. Lämmityksen poiskytkennän jälkeen suhteellisen kosteuden muutosta seurattiin vielä 2 viikkoa. Viimeisenä pinnoitettuja koesarjoja seurattiin pinnoituksen jälkeen 2 viikon ajan.

7.2 Kenttäkohde 1

Kenttäkohteelle 1 määritettiin kolme mittauspistettä 25 m² alueelle. Mittauspisteissä rakenteen kuivumista seurattiin kapasitanssineulapareilla sekä huokosilman suhteellista kosteutta mittaamalla. Pintavalun nimellispaksuudeksi oli ilmoitettu 50 mm, joten mitaussyvyyksiksi määritettiin 20 mm ja 35 mm. Mittalaitteet kiinnitettiin valualustana toimivaan Knauf aluspaperiin teippaamalla. Kuvassa 7.14 on yleiskuva kenttäkohteesta 1.



Kuva 7.14 Kenttäkohteen 1 lattiarakenne valupäivän aamuna. Kuvassa etualalla näkyy mittauspisteen MP3 kapasitanssineulapareit ja kauempana mittauspisteen MP1 kapasitanssineulapareit. Kyseisiin mittauspisteisiin porattiin myöhemmin myös mittausreiät. Kuvasta vasemmalle jää mittauspiste MP2, jossa rakenteen kuivumista seurattiin pelkästään kapasitanssineulaparien perusteella.

7.2.1 Mittalaitteiden asennus

Kenttämittauksia varten kehitettiin lämpöeristettyjä mittausputkia porareikämittauksiin sekä vapaasti sijoitettavia kapasitanssineulapareja (kuva 7.15). Kaikkiin mittauspisteisiin asennettiin valupäivän aamuna kapasitanssineulapareit noin 20 mm ja 35 mm syvyydelle tulevan valun pinnasta.



Kuva 7.15 Kohteelle valmistettiin lämpöeristetyt mittausputket ja vapaasti sijoiteltavat kapastaanssineulaparit. Kuvassa 5.28 on esitetty kapastaanssineulapari tarkemmin.

Kun kapastaanssimittauksen perusteella huokosilman suhteellinen kosteus oli laskenut alle 100 % RH, mittauspisteisiin MP1 ja MP3 porattiin vastaaville syvyyksille halkaisijaltaan 20 mm reiät. Poratut reiät imuroitiin reikään mahtuvalla suulakkeella ja mittausputket asennettiin tiiviisti reiän pohjaa vasten. Mittausputkien ja laatan pinnan liitos tiivistettiin liimamassalla. Tiivistyksen jälkeen mittausputkia ei enää imuroitu, koska eristetyt mittausputket oli täytetty solumuovinauhalla kondensoitumisen estämiseksi jo valmistusvaiheessa. Ohjekortissa RT 14-10984 kehoitetaan imuroimaan mittausreiät vielä mittausputken asennuksen jälkeen. Mittausreikien imuroinnin yhteydessä reiästä kuitenkin poistettiin mekaanisesti kaikki irtonainen ja helposti irtoava aines, joten putken asennusvaiheessa ei enää ollut odotettavissa pölyn tai rakeiden irtoamista mittausreiän pohjalle ja ohjeesta poikettiin perustellusti. Kuvassa 7.16 on esitetty kenttäkohteen 1 mittausreikien poraus ja mittausputkien asennus.



Kuva 7.16 Mittausputkien asennus. Määritetyille paikoille porattiin reiät, jotka imuroitiin ja tarkmitattiin. Reikiin asennettiin mittausputket, jotka lämpöeristettiin sisä- ja ulkopuolelta. Mittausputken pää teipattiin höyrynsulkuteipillä tasaantumisajaksi.

7.2.2 Valu

Kohteen pintalaatta valettiin pumppaamalla 31.08.2016 klo 10:00-11:00 välisenä aikana. Ennen massan levitystä urakoitsija tarkisti vaaituskoneella alusrakenteen suoruden ja merkkasi valupaksuuden muovisilla korkomerkeillä noin 1,5 m välein. Puurakenteinen välipohja varmasti myös taipuu massan painon alla, joten keskialueella valusta tulee paksumpi, kuin reunoilla.

Pumppausurakoitsija toi valussa tarvittavan, 1000 kg suursäkkeihin pakatun laastijauheen tullessaan. Massan valmistuksessa tarvittava vesi otettiin laajennettavan rakennuksen vesijohtoverkosta ja massa sekoitettiin pumppauskoneella. Massa pumpattiin halkaisijaltaan noin 50 mm putkessa kohteelle ja pumpattu massa tiivistettiin työvaihetta varten kehitetyllä työvälineellä. Tiivistyksen jälkeen valu todettiin valmiiksi. Kuvassa 7.17 on esitetty valu ja kuvassa 7.18 tiivistys ja lopputulos.



Kuva 7.17 Kenttäkohteen 1 valu. Kuvissa näkyvien korkomerkkien avulla valusta saadaan oikean paksuinen.

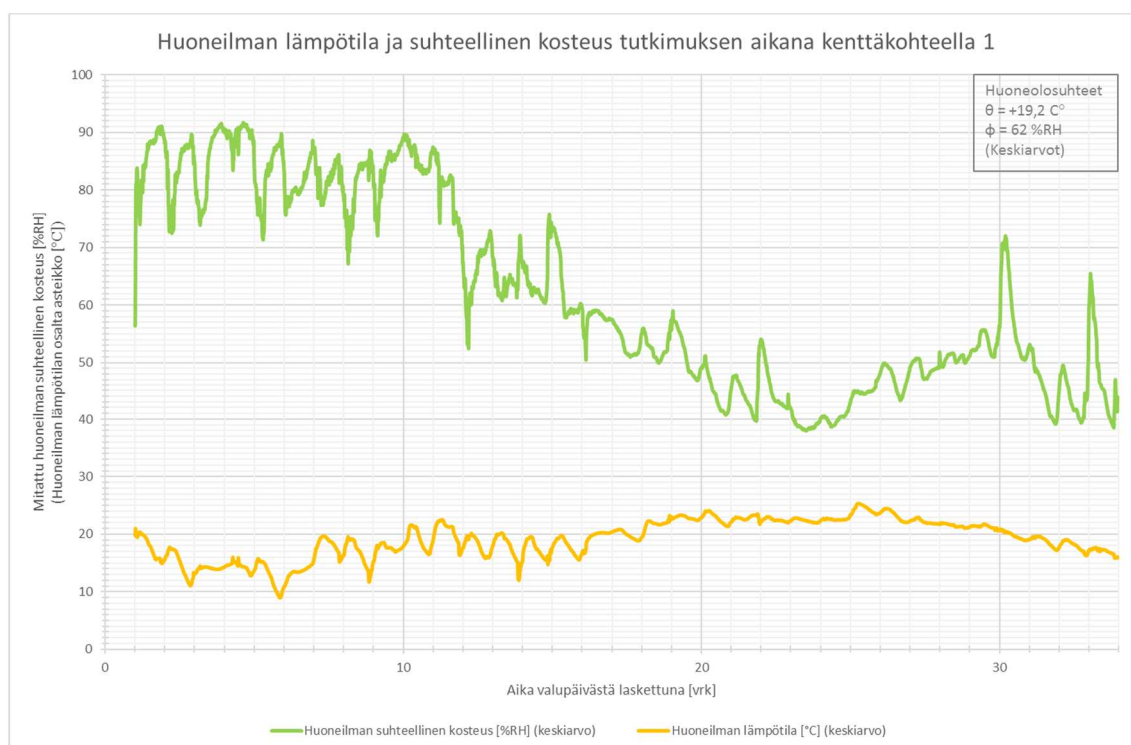


Kuva 7.18 Kenttäkohteen 1 tiivistys ja lopputulos. Massa tiivistettiin ”hevostelemalla”. Putkirakenteisella tiivistystyökalulla koko valualue käytiin läpi kumpaankin suuntaan, jolloin massassa mahdollisesti olevat ilmakuplat saadaan poistumaan ja varmistetaan, että massa menee myös lämmitysputkien alle.

7.2.3 Kuivumisen seuranta työmaolosuhteissa

Kenttäkohteella 1 käytiin yhteensä 9 kertaa, joista ensimmäinen kerta sisälsi kapasitanssineulojen asennuksen ja laatan valun. Muilla työmaakäynneillä asennettiin uusia ja luettiin jo asennettuja mittalaitteita.

Valupäivää seuraavan päivän aamuna kohteelle vietiin huoneolosuhteita mittaava Rotronic-laitteisto ja myös kapasitanssineulaparit luettiin ensimmäisen kerran. Rotronic-laitteiston mittausten aloitushetkeksi määritettiin 01.09.2016 klo 11:00 ja tallennusväliksi 15 minuuttia. Huoneilman lämpötilaa ja suhteellista kosteutta mitattiin tutkimuksen alkuvaiheessa yhdellä Rotronic-laitteistolla, jossa oli kolme anturia. Alkuvaiheessa anturit sijoiteltiin huonetilan ylä- ja alaosaan sekä keskialueelle. Kun rakenteen kuivumista alettiin seurata porarei’istä, Rotronic-laitteiston kaksi anturia mittasi rakenteen olosuhteita ja yksi huoneolosuhteita kuvassa 7.20 esitetyllä tavalla. Kuvassa 7.19 on esitetty huoneilman lämpötila ja suhteellinen tutkimuksen aikana kenttäkohteella 1.



Kuva 7.19 Huoneilman lämpötila ja suhteellinen kosteus tutkimuksen aikana kenttäkohteella 1. Kuvaajat on esitetty myös tämän tutkimuksen liitteessä.

Kenttäkohteen 1 kapasitanssin mittaustulokset antoivat 15.09.2016 viitteitä siitä, että huokosilman suhteellinen kosteus on anturien asennuksen kannalta turvallisella tasolla. Mittauspisteisiin MP1 ja MP3 porattiin mittausreiät ja asennettiin mittausputket 19.09.2016. Ohjekortin RT 14-10984 mukaan porattujen reikien on annettava tasaantua noin 72 h ennen mittauksia, joten mittausputkiin asennettiin anturit 22.09.2016. Kuvassa 7.20 on esitetty mittausjärjestelyt kohteella.



Kuva 7.20 Kenttäkohteen 1 Rotronic anturien asennus. Mittausputkessa olleet solumuovitäytteet ja putken päässä ollut höyrynsulkuteippi vedettiin pois putkessa olleella kaapelilla. Anturi asennettiin mittausputkeen, noin 2...3 mm irti reiän pohjasta ja tiivistettiin silikonilla mittausputkeen. Silikonin päälle painettiin pala solumuovieristettä (kuvassa vasemmassa ylänurkassa) ja lopuksi eristetty mittausputki vielä teipattiin höyrynsulkuteipillä.

Laitteiden toiminta käytiin varmistamassa 23.09.2016 ja 28.09.2016 ja samalla luettiin kapasitanssineulaparit. Mittaukset lopetettiin 04.10.2016, poratut reiät täytettiin solumuovipohjanauhalla ja tukittiin akryylimassalla. Jo samana päivänä kohteelle asennettiin lattian pintamateriaali, joten mittauksia jatkettiin niin kauan kuin se oli mahdollista.

7.3 Kenttäkohde 2

Kenttäkohteelle 2 määritettiin kaksitoista mittauspistettä 1360 m² alueelle. Kohteen lattiat valettiin kaksi kerrosta kerrallaan (ä 340 m²), kahden viikon välein. Tässä tutkimuksessa seurattiin kahden ensimmäisenä valetun alueen kuivumista ja mittalaitteet asennettiin kahdessa erässä työvaiheiden edetessä. Mittauspisteissä rakenteen kuivumista seurattiin kapasitanssineulapareilla sekä huokosilman suhteellista kosteutta mittaamalla. Pintalaa-

tan nimellispaksuudeksi askeläänilevyineen oli ilmoitettu 70 mm, joten mittaussyvyyksiksi määritettiin 20 mm ja 35 mm. Mittalaitteet kiinnitettiin valualustana toimivaan Sejo nystyrälevyyn teippaamalla. Kuvassa 7.21 on yleiskuva kenttäkohteesta 2.



Kuva 7.21 Kenttäkohteen 2 yleiskuva. Ylhäällä olevat kuvat havainnollistavat mittauspisteitä MP1, MP4, MP7 ja MP10. Vasen kuva alhaalla havainnollistaa mittauspisteitä MP2, MP5, MP8 ja MP11. Oikeanpuoleinen kuva alhaalla havainnollistaa mittauspisteitä MP3, MP6, MP9 ja MP12.

7.3.1 Mittalaitteiden asennus

Kenttäkohteella 2 käytettiin vastaavia testattuja ja hyväksi todettuja mittausmenetelmiä kuin kenttäkohteella 1. Tallentavat porareikämittaukset tehtiin lämpöeristetyistä mittausputkista, manuaalisesti luettavat porareikämittaukset tehtiin eristämättömistä mittausputkista ja kapasitanssin mittaukseen käytettiin vapaasti sijoiteltavia kapasitanssineulapareja (kuva 7.22). Kaikkiin mittauspisteisiin asennettiin valua edeltävänä päivänä kapasitanssineulaparit noin 20 mm ja 35 mm syvyydelle tulevan valun pinnasta.



Kuva 7.22 Kenttäkohteen 2 kapasitanssineulaparit ja porareikiin asennettavat mittausputket.

Mittauspisteissä MP1..MP6 huoneolosuhteiden tallennus Rotronic-laitteistoilla aloitettiin valua edeltävänä päivänä 03.11.2016 klo 12:00 alkaen, 15 minuutin välein. Mittauspisteissä MP7...MP12 huoneolosuhteiden tallennus CEM loggereilla aloitettiin 15 minuutin välein, niin ikään valua edeltävänä päivänä 15.11.2016 klo 12:00. Kenttäkohteella 2 käytetyt mittalaitteet on esitetty kuvassa 7.23.



Kuva 7.23 Kenttäkohteella 2 mittauksiin käytettiin Rotronic-laitteistoja (yläkuva), Vaisalan laitteita (vasen alhaalla) ja CEM loggereita (oikea alhaalla). CEM loggereita käytettiin vain mittauspisteissä MP7...MP12, Rotronic ja Vaisala laitteita kaikissa mittauspisteissä.

Myös kenttäkohteella 2 päätös reikien porausajankohdasta tehtiin kapasitanssineulojen mittaustulosten perusteella. Reiät porattiin ja puhdistettiin samalla tavalla kuin kenttäkohteella 1. Myös mittausputket asennettiin vastaavalla tavalla kuin kenttäkohteella 1 tiivistyksessä käytettyä liimamassaa lukuun ottamatta. Kuvassa 7.24 on esitetty kenttäkohteen 2 mittausreikien poraus ja mittausputkien asennus.



Kuva 7.24 Porareikämittaus kenttäkohteella 2.

Kenttäkohteen 2 mittauspisteissä MP1...MP6 eristettyjen mittausputkien tiivistykseen käytettiin kiinnityслиimaa, joka ei ollutkaan elastista vaan kovettuttuaan oli herkkä irtoamaan, jos mittausputkiin kohdistui isku. Tästä syystä kyseisten mittauspisteiden Rotronic laitteilla mitattuihin tuloksiin on syytä suhtautua kriittisesti. Osa mittausputkista oli jopa kokonaan irronnut alustastaan mittausten aikana, joskin kaikki mittausputket olivat porareissä.

Toisella asennuskerralla käytettiin elastista liimamassaa, joten mittauspisteissä MP7...MP12 mittausputket eivät olleet enää niin herkkiä vaurioitumaan. Toisella asennuskerralla asennettiin myös mittauspisteisiin MP1...MP12 eristämättömät mittausputket, eikä niissäkään havaittu vaurioita yhtä putkea lukuun ottamatta. Kuvassa 7.25 on esitetty mittausputkissa havaitut vauriot.



Kuva 7.25 Kenttäkohteella 2 mittausputkissa havaitut vauriot. Mittauspisteissä MP1...MP6 putket irtosivat laatasta herkästi. Kun vauriot havaittiin kolmen päivän kulluttua reikien porauksesta, liitokseen lisättiin silikonaa. Tästä huolimatta MP5 mittausputket olivat irronneet alustastaan seurantavaiheen aikana. Muissa jälkitiivistetyissä mittauspisteissä putket pysyivät tutkimuksen loppuajan paikallaan. Myöhemmin poratuissa mittauspisteissä käytettiin elastista liimamassaa, jolloin putket pysyivät hyvin kiinni alustassaan. Ainoa havaittu vaurio oli eristämättömän mittausputken vaurioituminen mekaanisen rasituksen seurauksena.

7.3.2 Valu

Tutkimuskohteena olleet pintalaatat valettiin pumppaamalla 04.11.2016 ja 16.11.2016. Mittalaitteet asennettiin valua edeltävänä päivänä, joten massan levitystä ja tiivistystä ei oltu seuraamassa. Kohteen laastijauhe kuitenkin nähtiin toimitettavan 1000 kg suursäkkeihin pakattuna ja massan valmistuksessa tarvittava vesi on todennäköisesti otettu kaupungin vesijohtoverkosta ja massa lienee sekoitettu pumppauskoneella.

Valmiissa valussa ei aistinvaraisesti havaittu virheitä tai poikkeamia. Joissain kohdissa massan pintaan oli noussut pieniä määriä askeläänieristeestä irronnutta EPS rouhetta. Kuvasssa 7.26 on esitetty kohteelle valettua pintalaattaa.

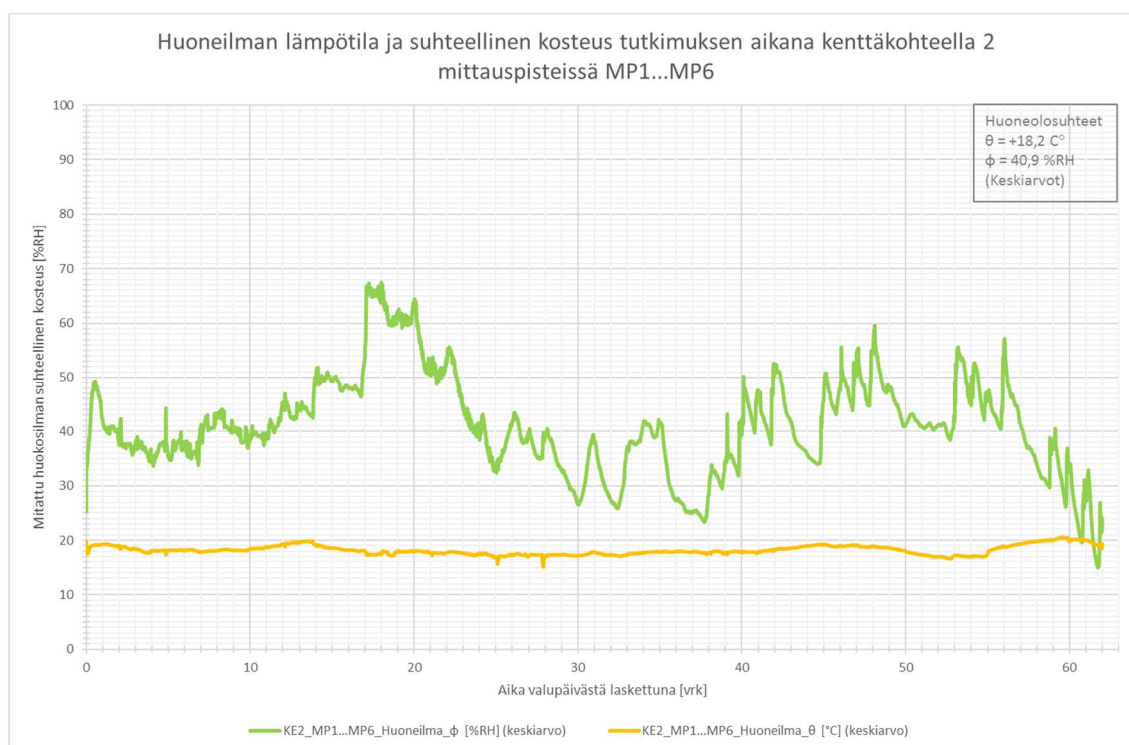


Kuva 7.26 Kenttäkohteella 2 valettua Knauf LM80 pintalaattaa.

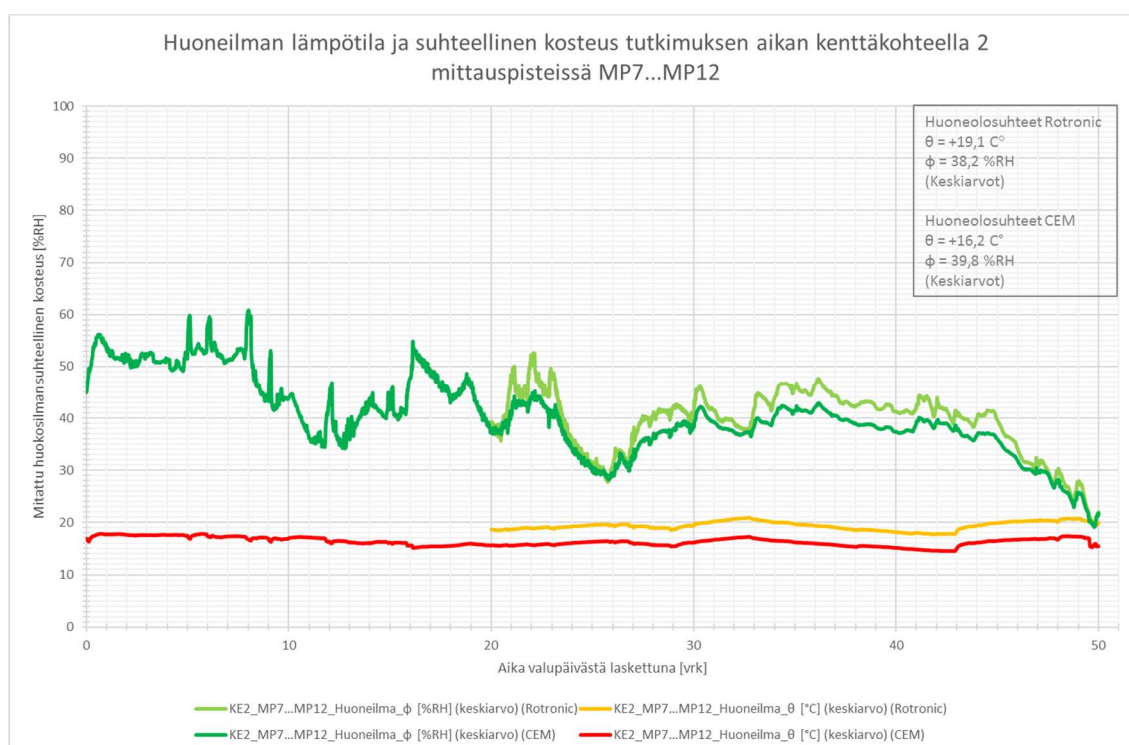
7.3.3 Kuivumisen seuranta työmaolosuhteissa

Kenttäkohteella 2 käytiin yhteensä 12 kertaa, joista ensimmäinen kerta sisälsi kohteeseen tutustumisen ja työmaaperehdytyksen. Toisella käynnillä asennettiin ensimmäiset mittalaitteet ja muilla työmaakäynneillä asennettiin uusia sekä luettiin jo asennettuja mittalaitteita.

Mittauspisteissä MP1...MP6 Rotronic-laitteiston mittausten aloitushetkeksi määritettiin 03.11.2016 klo 12:00 ja tallennusväliksi 15 minuuttia. Mittauspisteissä MP7...MP12 huoneolosuhteiden tallennus aloitettiin CEM loggereilla 15.11.2016 ja näiden rinnalle tuotiin Rotronic laitteet, joilla tallennus aloitettiin 28.11.2016 klo 12:00, molempien laitteistojen tallennusvälin ollessa 15 minuuttia. Kuvassa 7.27 on esitetty mittauspisteiden MP1...MP6 ja kuvassa 7.28 mittauspisteiden MP7...MP12 huoneolosuhteet tutkimuksen aikana.

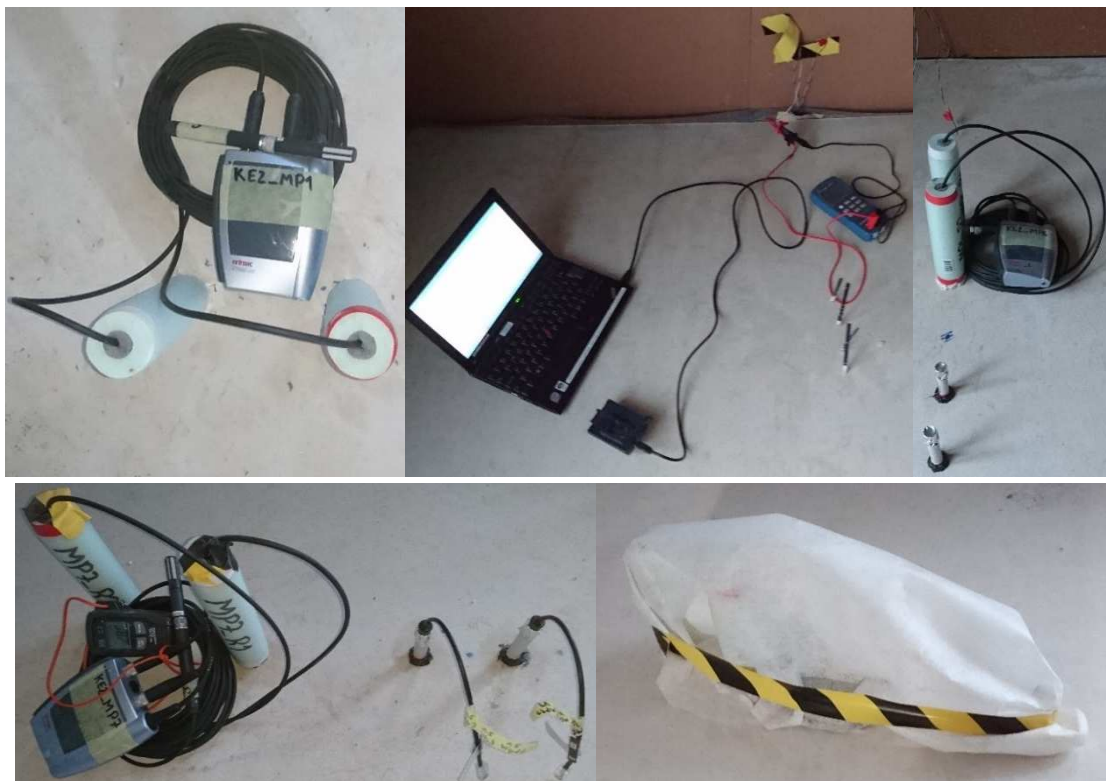


Kuva 7.27 Huoneilman lämpötila ja suhteellinen kosteus tutkimuksen aikana kenttäkohteella 2 mittauspisteissä MP1...MP6. Kuvaajat on esitetty myös tämän tutkimuksen liitteessä.



Kuva 7.28 Huoneilman lämpötila ja suhteellinen kosteus tutkimuksen aikana kenttäkohteella 2 mittauspisteissä MP7...MP12. Kuvaajat on esitetty myös tämän tutkimuksen liitteessä.

Mittauspisteissä MP1...MP6 kapasitanssin mittaustulokset antoivat 15.1.2016 viitteitä siitä, että huokosilman suhteellinen kosteus on anturien asennuksen kannalta turvallisella tasolla. Mittauspisteisiin MP1...MP6 porattiin mittausreiät ja asennettiin mittausputket 18.11.2016. Ohjekortin RT 14-10984 mukaan porattujen reikien on annettava tasaantua noin 72 h ennen mittauksia, joten mittausputkiin asennettiin anturit 21.11.2016. Mittauspisteisiin MP7...MP12 porattiin mittausreiät ja asennettiin mittausputket 28.11.2016. Mittausputkiin asennettiin anturit 02.12.2016, minkä jälkeen kaikkien mittauspisteiden seuranta oli jatkuva. Mittausjärjestelyt kenttäkohteella 2 on esitetty kuvassa 7.29.



Kuva 7.29 Mittausjärjestelyt kenttäkohteella 2. Mittalaitteet kasattiin tiiviisti porareikien ympärille ja koko mittauspiste suojattiin suodatinkankaalla.

Laitteiden toiminta käytiin varmistamassa 16.12.2016 ja samalla luettiin kapasitanssi-neulaparit. Mittaukset lopetettiin 05.01.2017. Mittausten lopetukseen liittyvät työvaiheet on esitetty kuvassa 7.30.



Kuva 7.30 Mittausten lopetus kenttäkohteella 2. Kaikki reiät porattiin läpi ja laatan paksuus mitattiin. Reiät täytettiin solumuovinauhalla ja tiivistettiin akryylimassalla.

7.3.4 Mittaustulosten varmentaminen rinnakkaismittauksilla

Kenttäkohteen 2 mittaustuloksia päätettiin varmentaa rinnakkaismittauksilla, mittauspisteissä MP1...MP6 ilmenneiden mittausputkien tiivistysvaurioiden takia. Työmaakäynnillä 28.11.2016 kaikkiin mittauspisteisiin MP1...MP12 porattiin mittausreiät 20 mm ja 35 mm syvyydelle lähelle muita mittalaitteita. Mittausreikiin asennettiin eristämättömät mittausputket, jotka tiivistettiin valun pintaan elastisella liimamassalla ja joiden päät oli suljettu tiiviisti alumiiniteipillä jo valmistuksen yhteydessä. Myös näiden mittausreikien imuroinnin yhteydessä rei'istä poistettiin mekaanisesti kaikki irtonainen ja helposti irtoava aines, joten putken asennusvaiheessa ei enää ollut odotettavissa pölyn tai rakeiden irtoamista mittausreiän pohjalle ja RT 14-10984 ohjeesta poikettiin perustellusti.

Mittausputkista luettiin huokosilman suhteellinen kosteus ensimmäisen kerran 16.12.2016 ja toisen kerran 05.01.2016. Mittausputket oli tiivistetty alumiiniteipillä jo ennen asennusta ja ne myös teipattiin uudelleen heti kun ensimmäinen mittausta oli tehty. Mittapääät kuljetettiin kalibrointitilana toimineesta vakio-olosuhdehuoneesta kenttäkohteelle tiiviissä ja lämpöeristetyssä muovipussissa. Kuljetuksen aikana mittalaitteet säilytettiin auton lämpimässä matkustamotilassa, joten mittapääät olivat lähellä mittaolosuhteita jo kohteelle saavuttaessa. Mittausvälineet säilytettiin vakio-olosuhdehuoneessa mitausten välillä.

Mittauksissa Vaisalan HMP44 mittapää painettiin putken päässä olevan alumiiniteipin läpi mittausputkeen, jolloin mittapäähän asennettu tiivistyskartio sulkee putken tiiviisti. Mittapäiden annettiin tasaantua mittaosputkissa 90...120 minuuttia ennen tulosten lukemista, joten mittapää oli varmasti saavuttanut tasapainotilan. Kuvassa 7.31 on esitetty Vaisalan mittapään asennus ja tiivistys mittaosputkeen.



Kuva 7.31 Vaisalan mittapäiden asennus ja tiivistys mittaosputkeen kenttäkohteella 2.

8. TULOKSET

Mittaustulosten perusteella pystyttiin määrittämään aika, joka rakenteilla ja koekappaleilla kului tavoitekosteuspitoisuuksien saavuttamiseen. Kuivumisaika määritettiin valuhetkestä siihen saakka, kun mitattu huokosilman suhteellisen kosteuden arvo saavuttaa tavoitekosteuspitoisuuden arvostelusyvytydellä $0,4 \cdot d$. Tavoitekosteuspitoisuudet olivat tutkimussuunnitelman mukaisesti 85 % RH, 80 % RH ja 75 % RH.

Vertailukelpoisten tulosten saavuttamiseksi mittaussyvyyksiksi oli vakioitu 20 mm, 35 mm ja 65 mm. Näistä arvoista 20 mm vastaa arvostelusyvytyttä 50 mm valuissa ja 35 mm mittaustuloksia voidaan käyttää 80 mm valuissa.

Mittaustuloksissa oli luontaista hajontaa ja tästä syystä kuivumisaika määritettiin otoskeskiarvon, otoshajonnan ja normaalijakauman käänteisfunktion avulla. Laskennassa käytettiin valmiita Microsoft Excel 2016 kaavoja KESKIARVO([luku1]; [luku2]; [luku3]), KESKIHAJONTA([luku1]; [luku2]; [luku3]) ja NORMAALI.JAKAUMA.KÄÄNT(todennäköisyys; keskiarvo; keskihajonta). Todennäköisyydeksi määritettiin 95%, joten ilmoitettujen mittaustulosten perusteella vain 5% vastaavista rakenteista vaatii ilmoitettua pidemmän kuivumisaajan.

Laboratoriokokeissa otoskeskiarvo ja otoshajonta laskettiin kuivumisen alkuvaiheessa kaikkien kolmen rinnakkaiskoekappaleen tuloksista ja kun sarjan ensimmäinen koekappale pinnoitettiin, laskentaa jatkettiin kahden pinnoittamattoman koekappaleen tuloksista. Tilastollisten tunnuslukujen laskenta lopetettiin, kun koesarjasta oli pinnoitettu 2 koekappaleita. Koesarjan 50_4 koekappaleita ei pinnoitettu, joten 95 %-fraktiili pystyttiin määrittämään koko tutkimusajalle.

Kenttäkohteen 1 tuloksista otoskeskiarvo ja otoskeskihajonta pystyttiin laskemaan vain kahden rinnakkaistuloksen perusteella, koska yhdessä kolmesta mittauspisteestä ei ollut loggaavaa laitteistoa. Tutkimuksen aikana rakenteeseen ei tehty muutoksia, joten 95 %-fraktiili on määritetty koko seuranta-ajalle.

Kenttäkohteen 2 tuloksissa on 12 rinnakkaista mittaustulosta, jotka käsiteltiin kahdessa erässä, koska tutkimuskohteena olleet pintalaatat valettiin eri aikaan. Tällöin kenttäkohteen 2 tuloksissa on 6 täysin rinnakkaista mittaustulosta. Kenttäkohteessa 2 määritettiin kummankin rinnakkaissarjan kuivumisaajan 95 %-fraktiili koko sille ajalle, jona valun kuivumista seurattiin porareijistä. Lisäksi tuloksia käsiteltiin myös kokonaisuutena esimerkiksi yleisemmän kuivumisaika-arvion määrittämiseksi ja kapasitanssimittaustulosten käsittelyn yhteydessä.

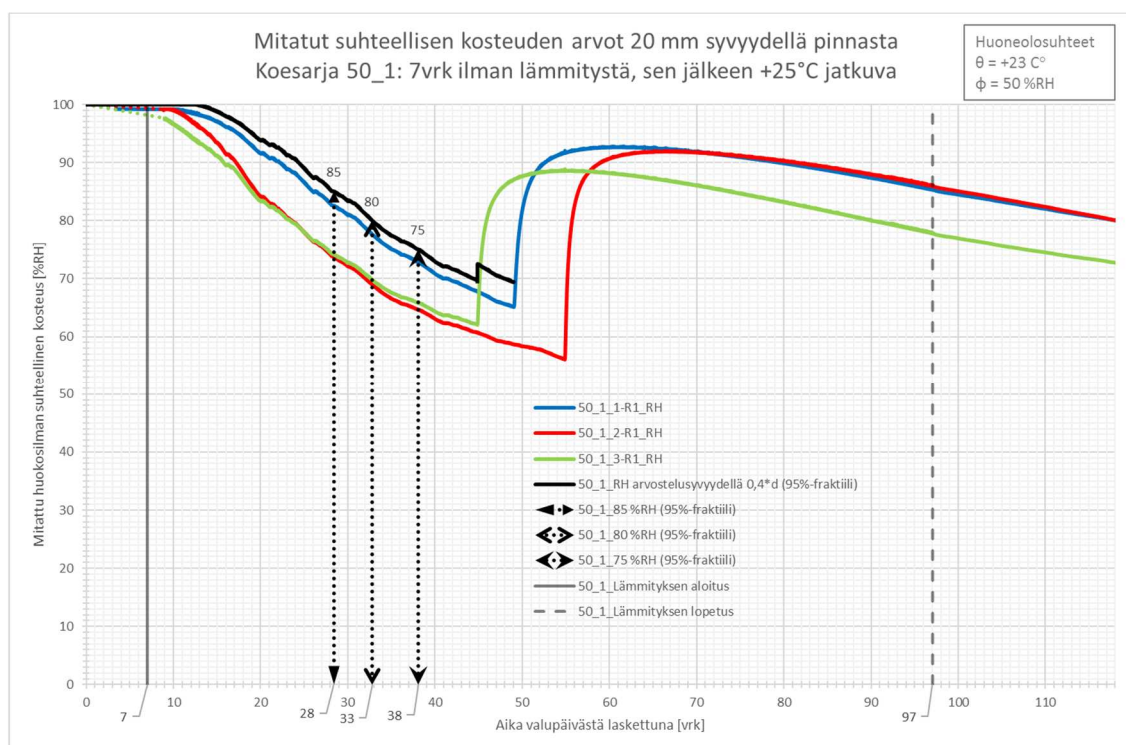
8.1 Laboratoriokokeet

Koesarjoissa 50_1, 50_2, 50_3 ja 80_2 koekappaleiden huokosilman suhteellista kosteutta ja lämpötilaa seurattiin 118 vuorokauden ajan valuhetkestä laskettuna. Koesarjaa 50_4 seurattiin vastaavasti 132 vuorokauden ajan ja koesarjoja 80_1 ja 80_3 seurattiin 210 vuorokautta. Taulukossa 8.1 on esitetty eri koesarjojen kuivumisajat päämittausmenetelmän 95 %-fraktiilin kuvaajasta määritettynä. Päämittausmenetelmällä tarkoitetaan Rotronic-laitteistoilla tehtyjä mittauksia. Kuvassa 8.1 on esitetty esimerkkinä koesarjan 50_1 mittaustulokset. Muiden koesarjojen mittaustulokset ovat liitteinä työn lopussa.

Taulukko 8.1 Laboratoriokoesarjojen Rotronic laitteilla määritetyt kuivumisajat eri tavoitekosteuspitoisuuksiin arvostelusyvytydellä 0,4*d.

Koesarja	85 %RH	80 %RH	75 %RH
50_1	28 vrk	33 vrk	38 vrk
50_2	15,5 vrk	15,8 vrk	16,2 vrk
50_3	30 vrk	34 vrk	40 vrk
50_4	80 vrk	89 vrk	98 vrk
80_1	93 vrk	108 vrk	123 vrk
80_2	27,8 vrk	28,7 vrk	29,1 vrk
80_3	117 vrk	134 vrk	152 vrk

HUOM! Koesarjan 50_4 mittauksissa tuloksia vääristävä tekijä, ks. luku 10.3. ja liitteet

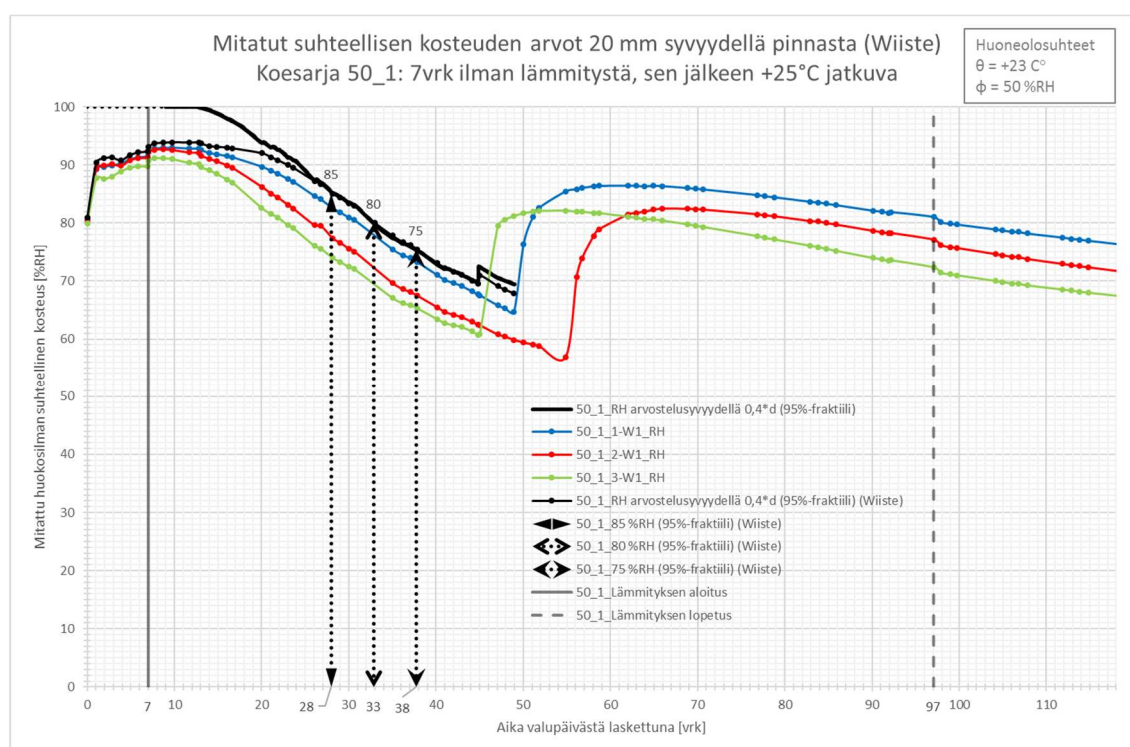


Kuva 8.1 Koesarjan 50_1 kuivumisajat tavoitekosteuspitoisuuksiin 85, 80 ja 75 %RH. Pisteviivalla merkityltä aikaväliltä ei ole mittaustuloksia. Voimakas nousu kuvaajissa on aiheutunut koekappaleiden pinnoituksesta.

Laboratoriotutkimuksessa rinnakkaismittauksia tehtiin Wiiste Oy:n SolidRH -laitteistoilla. Mittaustulosten kuvaajien muodot vastasivat toisiaan mittaamenetelmien välillä, mutta kuivumisajoissa oli jonkin verran eroa erityisesti lämmitetyissä koesarjoissa. Koesarjalle 50_4 ei tehty rinnakkaismittauksia. Taulukossa 8.2 on esitetty eri koesarjojen kuivumisajat rinnakkaismittausmenetelmän 95 %-fraktiilin kuvaajasta määritettynä. Kuvassa 8.2 on esitetty esimerkkinä koesarjan 50_1 rinnakkaismittaustulokset. Muiden koesarjojen mittaustulokset ovat liitteinä työn lopussa.

Taulukko 8.2 Laboratoriokoesarjojen Wiiste laitteilla määritetyt kuivumisajat eri tavoitekosteuspitoisuuksiin arvostelusyvytydellä 0,4*d.

Koesarja	85 %RH	80 %RH	75 %RH
50_1	28 vrk	33 vrk	38 vrk
50_2	17,6 vrk	17,9 vrk	18,2 vrk
50_3	21 vrk	26 vrk	32 vrk
50_4	-	-	-
80_1	115 vrk	132 vrk	152 vrk
80_2	45,9 vrk	46,1 vrk	46,4 vrk
80_3	96 vrk	115 vrk	134 vrk



Kuva 8.2 Koesarjan 50_1 rinnakkaismittausmenetelmän mukaiset kuivumisajat tavoitekosteuspitoisuuksiin 85, 80 ja 75 % RH. Pisteviivalla merkityltä aikaväliltä ei ole mittaustuloksia. Voimakas nousu kuvaajissa on aiheutunut koekappaleiden pinnoituksesta.

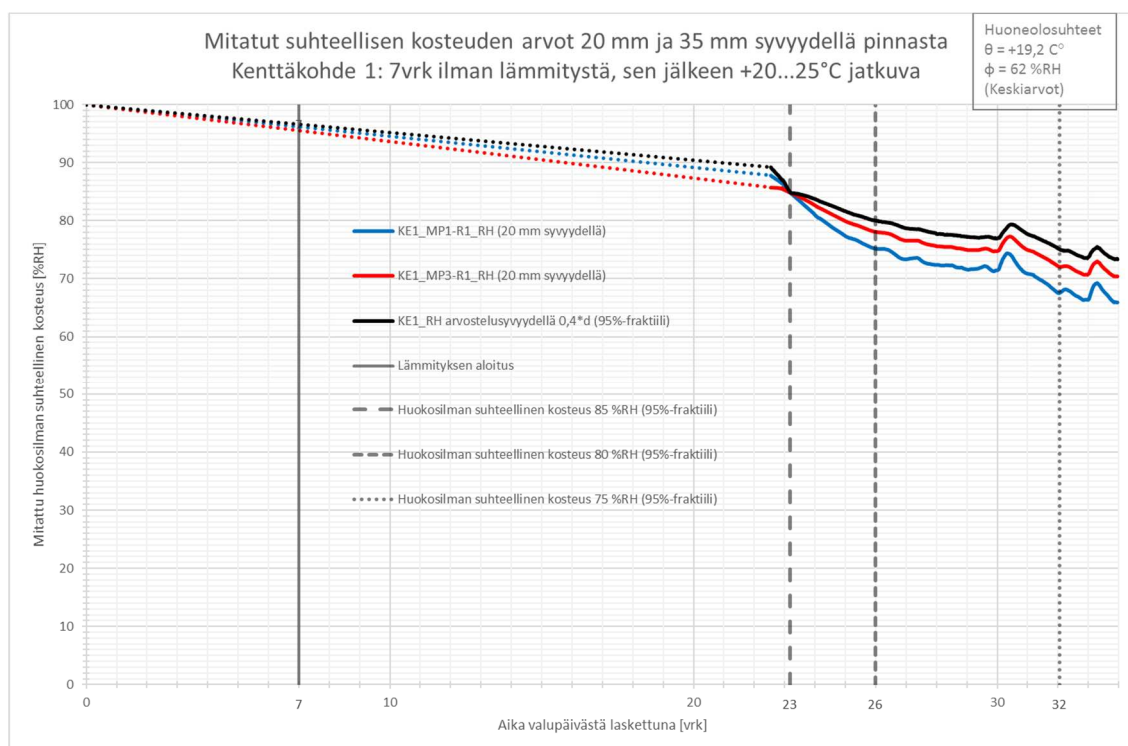
8.2 Kenttäkohde 1

Kenttäkohteella 1 pintavalun huokosilman suhteellista kosteutta ja lämpötilaa seurattiin 34 vuorokauden ajan valuhetkestä laskettuna. Kohteella käytettiin suhteellisen kosteuden ja lämpötilan mittaukseen pelkästään Rotronic-laitteistoja, joten rinnakkaismittaustuloksia ei ole.

Taulukossa 8.3 on esitetty pintavalun kuivumisaika mittaustulosten 95 %-fraktiilin kuvaajasta määritettynä. Kuvassa 8.3 on esitetty kenttäkohteen 1 mittaustulokset, jotka ovat myös liitteenä työn lopussa.

Taulukko 8.3 Kenttäkohteen 1 Rotronic laitteilla määritetyt kuivumisaikat eri tavoitekosteuspitoisuuksiin arvostelusyvytydellä 0,4*d.

Mittauspisteet	85 %RH	80 %RH	75 %RH
MP1...MP3	23 vrk	26 vrk	32 vrk



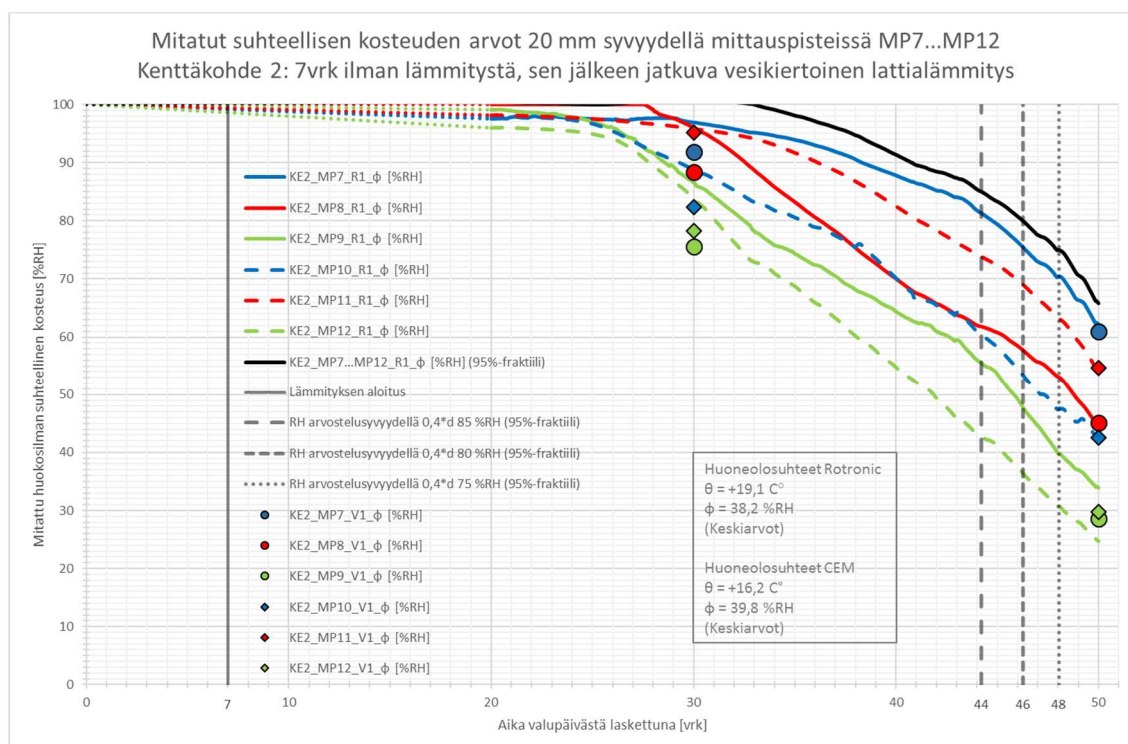
Kuva 8.3 Kenttäkohteen 1 pintalaatan kuivumisaikat tavoitekosteuspitoisuuksiin 85, 80 ja 75 % RH. Pisteviivalla merkityltä aikaväliltä ei ole mittaustuloksia, koska anturien suuren vaurioitumisriskin vuoksi anturit asennettiin mittausputkiin vasta noin kolmen viikon kuluttua valusta. Vesikiertoinen lattialämmitys kytkettiin päälle 7 vuorokauden kuluttua valusta.

8.3 Kenttäkohde 2

Kenttäkohteella 2 pintavalun huokosilman suhteellista kosteutta ja lämpötilaa seurattiin valuhetkestä laskettuna 62 vuorokauden ajan mittauspisteissä MP1...MP6 ja 50 vuorokauden ajan mittauspisteissä MP7...MP12. Päämittausmenetelmänä oli tallentava mitaus Rotronic laitteilla, mutta kohteella tehtiin myös rinnakkaismittaukset kaikissa mittauspisteissä Vaisalan laitteilla kahteen kertaan. Mittauspisteissä MP1...MP6 rinnakkaismittaukset tehtiin 42 ja 62 vuorokauden kuluttua valusta. Mittauspisteissä MP7...MP12 rinnakkaismittaukset tehtiin samalla työmaakäynnillä, joten valusta oli tällöin kulunut 30 ja 50 vuorokautta. Taulukossa 8.4 on esitetty pintavalun kuivumisaika mittauspisteissä MP1...MP6 ja MP7...MP12 mittaustulosten 95 %-fraktiilin kuvaajasta määritettynä. Kuvasssa 8.4 on esitetty kenttäkohteen 2 mittauspisteiden MP7...MP12 mittaustulokset arvostelususvyydellä. Muut mittaustulokset on esitetty työn lopussa liitteinä.

Taulukko 8.4 Kenttäkohteen 2 Rotronic laitteilla määritetyt kuivumisaajat eri tavoitekosteuspi-toisuuksiin arvostelususvyydellä 0,4*d.

Mittauspisteet	85 %RH	80 %RH	75 %RH
MP1...MP6	39 vrk	42 vrk	44 vrk
MP7...MP12	44 vrk	46 vrk	48 vrk



Kuva 8.4 Kenttäkohteen 2 mittauspisteiden MP7...MP12 kuivumisaajat tavoitekosteuspi-toisuuksiin 85, 80 ja 75 % RH. Pisteviivalla merkityltä aikaväliltä ei ole mittaustuloksia. Huomion arvoista on, että ensimmäisellä rinnakkaismittaukskerralla mitatut tulokset antavat poikkeuksetta matalampia suhteellisen kosteuden arvoja, kuin päämittausmene-telmä. Toisella rinnakkaismittaukskerralla mittaustulokset ovat yhteneviä.

8.4 Kapasitanssimittaukset

Tutkimuksen kannalta tärkeimpänä havaintona kapasitanssin mittauksissa oli että mitatun kapasitanssin arvo laski välille $1...5\ \mu\text{F}$, suhteellista kosteutta mittaavat anturit pystyttiin asentamaan mittausputkiin ilman riskiä anturien vaurioitumisesta. Tällöin mitatut suhteellisen kosteuden arvot olivat pääasiassa välillä $98...95\ \text{RH}$ ja tällä perusteella asennettujen anturien olosuhteet mittausputkissa ehtivät varmasti tasaantua ennen tavoittekosteuspitoisuuksien saavuttamista. Erityisesti kenttätutkimuskohteissa saavutettiin suurta etua, kun antureita ei tarvinnut asentaa epävarmoin perustein, jolloin laitteiden toimintaa olisi pitänyt seurata alussa tiheämmin.

Laboratoriotutkimuksessa oli käytössä yhteensä 54, kenttäkohteella 1 oli 6 ja kenttäkohteella 2 oli 24 kapasitanssineulaparia, joten tutkimuksessa seurattiin yhteensä 84 kapasitanssineulaparin mittaustulosten muutosta rakenteen kuivuessa.

Kapasitanssineulojen tuloksia luettiin yhteensä 128 eri mittauskerralla ja mittaustuloksia kirjattiin 3552 kappaletta. Kaikille mittaustuloksille ei kuitenkaan ole vastinarvoa suhteellisen kosteuden mittaustuloksissa, koska suuri osa mittauksista tehtiin kuivumisen alkuvaiheessa, jolloin huokosilman suhteellista kosteutta ei vielä pystytty mittaamaan. Kapasitanssimittarin ominaisuuksista johtuen kaikista mittauspisteistä ei aina saatu lukemaa kuivumisen myöhemmässä vaiheessa vaan pelkkä ilmoitus mittauksen epäonnistumisesta, joten muutamia vastinpareja jouduttiin karsimaan pois myös kapasitanssiarvon puuttuessa. Lopulta vastinpareja saatiin 2624 kappaletta, mutta näissä tuloksissa 1200 vastinparin suhteellisen kosteuden arvoksi oli määritetty $100\ \text{RH}$. Vastinpareissa suhteellisen kosteuden arvoksi merkittiin $100\ \text{RH}$, jos antureita ei vielä ollut asennettuna mittausputkiin.

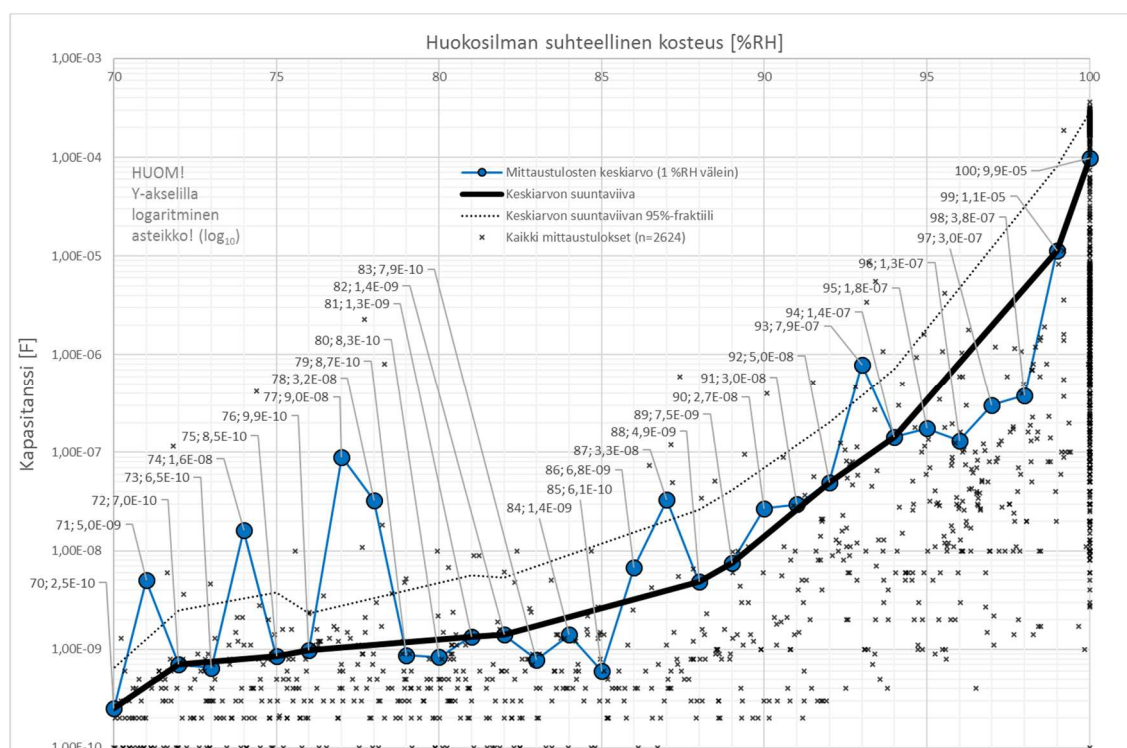
Mitattujen kapasitanssiarvojen suuruudet vaihtelivat välillä $0,327\ \text{mF}...0,05\ \text{nF}$, joten mittaustulosten skaala on laaja. Suurimpia, millifaradeissa mitattavia arvoja saatiin koesarjan 50_4 valun yhteydessä, kun tuloksia mitattiin heti valun jälkeen sitoutumattomasta massasta. Pääosa tuloksista kirjattiin mikrofaraadeina, jolloin lukuarvot vaihtelivat välillä $0,001...300\ \mu\text{F}$. Kuivumisen edetessä lukemia pystyttiin kirjaamaan nanofaraadeina, jolloin lukuarvot vaihtelivat välillä $0,05...49,1\ \text{nF}$.

Taulukossa 8.5 on esitetty koejärjestelyn mukaisesti mitattuja kapasitanssin arvoja. Taulukossa on myös kerrottu, kuinka monen pisteen keskiarvona kapasitanssin suuruus on määritetty. Kapasitanssin keskiarvoa määritettäessä mukaan laskettiin kaikki kyseisellä kokonaisluvulla alkaneet vastinparit. Esimerkiksi arvoon $85\ \text{RH}$ huomioitiin kapasitanssin suuruudet väliltä $85,00...85,99\ \text{RH}$. Oikeammin ilmoitettavan suhteellisen kosteudenkin pitäisi olla kyseisen otoksen keskiarvo, mutta selkeyden vuoksi suhteellisesta kosteudesta ilmoitetaan tasaluku ja kapasitanssista keskiarvo. Näin myös ilmoitettu tulos saadaan varmalle puolelle, koska todellisuudessa suhteellinen kosteus saattaa olla matalampi, kuin vastinparista voidaan päätellä.

Taulukko 8.5 Tutkimuksessa määritettyjä RH/C -lukupareja.

(HUOM! Arvot eivät ole yleisesti päteviä!)

Suhteellinen kosteus [%RH]	Kapasitanssi	n	Suhteellinen kosteus [%RH]	Kapasitanssi	n
100	98,6 μF	1200	85	6,06 nF	16
99	11,3 μF	19	84	1,41 nF	20
98	0,38 μF	30	83	0,79 nF	21
97	0,30 μF	31	82	1,41 nF	24
96	0,13 μF	47	81	1,35 nF	21
95	0,18 μF	40	80	0,83 nF	38
94	0,14 μF	28	79	0,87 nF	22
93	0,79 μF	24	78	32,5 nF	26
92	0,50 μF	28	77	89,5 nF	26
91	0,30 μF	25	76	0,99 nF	24
90	0,27 μF	21	75	0,85 nF	30
89	7,52 nF	21	74	16,1 nF	27
88	4,86 nF	21	73	0,65 nF	24
87	3,30 nF	24	72	0,70 nF	24
86	6,80 nF	12	71	5,02 nF	26
			70	0,25 nF	29

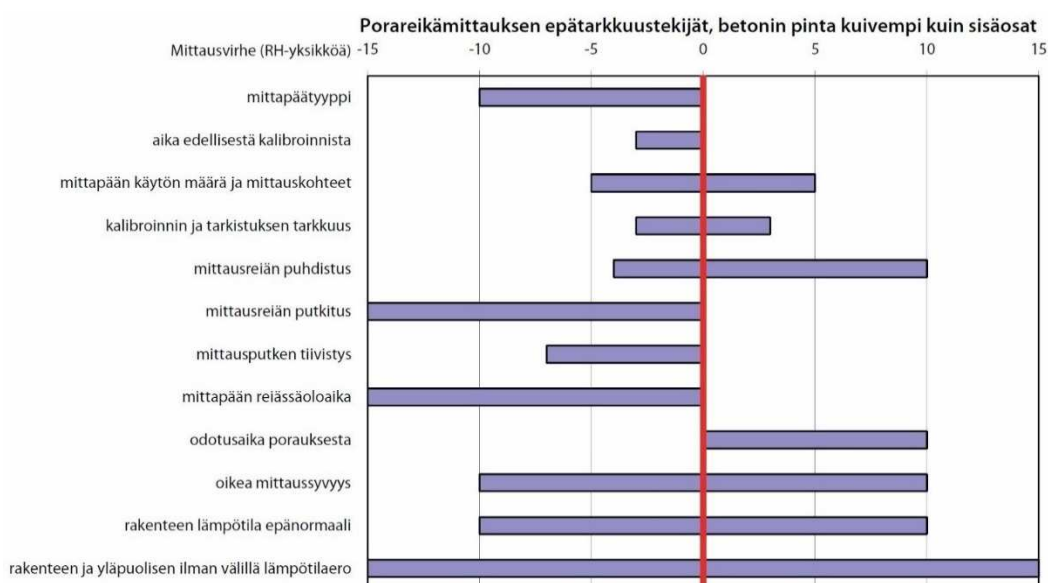
**Kuva 8.5** Koejärjestelyn mukaisesti mitatun kapasitanssin yhteys Knauf LM 80 lattiamassan huokosilman suhteelliseen kosteuteen. HUOM! Kuvaajassa suhteellinen kosteus vain välillä 70...100 % RH ja kapasitanssi on esitetty logaritmisella asteikolla (\log_{10}).

9. TULOSTEN LUOTETTAVUUDEN ARVIOINTI

Lähteessä (Merikallio 2009) on käsitelty betonilattian kosteusmittauksen luotettavuuden arviointia, mutta samoja periaatteita voidaan noudattaa myös kipsivalulattian kuivumisessa, koska kyseessä on vastaaventyypinen kiviaineinen ja valamalla asennettava massa. Myös ohjekortissa RT 14-10984 on ohjeistettu mittauksen luotettavuuden arviointiin ja kortin johdanto-osiossa mainitaan ohjeiden soveltuvan kiviaineisten rakenteiden suhteellisen kosteuden mittaamisen tarkkuustekijöiden arviointiin.

Tärkeimmiksi kosteusmittauksen luotettavuuteen vaikuttaviksi tekijöiksi mainitaan mittauslaite, mittausmenetelmä, mittaaja ja ympäristö. Luotettavuuden arvioinnissa on tarkoituksena selvittää eri tekijöistä aiheutuva mittausvirhe, joka tarkoittaa mittaustuloksen ja todellisen arvon välistä eroa. Mittausvirhe koostuu systemaattisesta ja satunnaisesta virheestä. Systemaattinen virhe voi aiheutua esimerkiksi mittalaitteen kalibroinnissa tehdystä virheestä, jolloin kaikki mittaustulokset ovat samaan suuntaan virheellisiä. Satunnainen virhe voi aiheutua esimerkiksi yksittäisen mittausputken puutteellisesta tiivistyksestä tai tuloksen kirjausvirheestä. (Merikallio 2009 s.76)

Mittausvirhettä ei kosteusmittauksessa tiedetä, koska mitattavan suureen tosiarvoa ei tunneta. Tästä syystä tulosten luotettavuuden arvioinnissa on ilmoitettava mittausepävarmuus, joka koostuu useista eri osatekijöistä. Koska näiden osatekijöiden todellista arvoa ja vaikutusta mittaustuloksiin on mahdotonta tietää, joten myös mittausepävarmuuden määrittämiseen sisältyy suurta epävarmuutta. Kuvassa 9.1 on esitetty RT 14-10984 ohjekortin mukaiset porareikämittauksen epävarmuustekijät ja taulukossa 9.1 on esitetty lähteen (Merikallio 2009 s.78) mukainen jaottelu.



Kuva 9.1 RT 14-10984 mukaiset porareikämittauksen epävarmuustekijät (RT 14-10984).

Taulukko 9.1 Rakenteen suhteellisen kosteuden mittaamiseen liittyviä epävarmuustekijöitä. (Perustuu lähteeseen Merikallio 2009 s.78).

Mittausepävarmuuslähde	
Mittalaite	Mittalaitteen epälineaarisuus (systemaattinen)
	RH mittapään hiipuma (systemaattinen)
	Mittapään hystereesi (satunnainen)
Mittalaitteen kalibrointi	Kalibrointilämpötila (systemaattinen)
	Suolaliuoksen ominaisuudet (satunnainen)
	Lämpötilamuutokset kalibroinnin aikana (satunnainen)
	Muut kalibroinnin aikana vaikuttavat tekijät (satunnainen)
	Kalibroinnin kokonaismittausepävarmuus (satunnainen)
Mittalaitteen käsittely mittauksen aikana ja mittausten välillä	Mittaus eri lämpötilassa kuin kalibrointi (systemaattinen)
	Mittaushetken lämpötila eri kuin käyttölämpötila (systemaattinen)
	RH mittapään säilytys kuivissa olosuhteissa (systemaattinen)
	RH mittapään kosteuskapasiteetti porareissä (systemaattinen)
	Lämpötilaero mittapään ja rakenteen välillä (systemaattinen)
	Porareian tasaantuminen (systemaattinen)
	Materiaalin emäksisyys (systemaattinen)
	Lämpötilan muuttuminen mittauksen aikana (satunnainen)
	Kosteuden kondensoituminen mittausputkeen (satunnainen)
	Mittausreiän syvyyden vaihtelu (satunnainen)
Mittaustulosten analysointi	Väärin arvioitu rakenteen paksuus (satunnainen)

RT 14-10984 mukaisesti toteutetuilla tarkoilla mittausmenetelmillä on ohjekortin mukaan mahdollista saada eri epätarkkuustekijä rajattua suuruusluokkaan ± 2 RH%-yksikköä ja kokonaistarkkuus vähintään suuruusluokkaan ± 5 RH%-yksikköä. Käydään seuraavaksi läpi tutkimuksessa vaikuttavat epätarkkuustekijät tutkimuskohteittain. Lähteen (Merikallio 2009 s.77) mukaan kokonaismittausepävarmuutta voidaan arvioida kaavan 9.1 mukaisella neliöjuurilausekkeella.

$$S_{tot} = \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 + \dots + S_n^2} \quad (9.1)$$

Kaavassa 9.1 S_{tot} on kokonaismittausepävarmuus ja $S_1 \dots S_n$ on eri epävarmuustekijöiden mittausepävarmuus.

9.1 Epätarkkuustekijät mittauslaitteistoissa

Mittauslaitteistona tutkimuksessa käytettiin ensisijaisesti Rotronic-laitteistoja, joiden mittaustuloksia varmennettiin rinnakkaismittauksilla. Rinnakkaismittauksilla pyrittiin parantamaan tulosten luotettavuutta ja niiden tarkoituksena oli myös auttaa tulosten tulokinnassa mahdollisissa epäselvissä tapauksissa. Rinnakkaismittauksiin käytettiin Wiis-teen ja Vaisalan mittalaitteita. Arvioidaan seuraavaksi eri mittalaitteiden luotettavuutta taulukossa 9.1 esitettyjä mittausepävarmuustekijöitä läpikäyden ja kootaan virhelähteiden vaikutukset taulukkomuotoon.

Lämpötilan merkitys suhteellisen kosteuden arvoon on erittäin merkittävä, joten suhteellista kosteutta määritettäessä lämpötilamittauksen mittaustarkkuus on selvitettävä. Laitevalmistajien mittalaitteilleen ilmoittamat suhteellisen kosteuden mittaustarkkuudet sisältävät lämpötilan mittauksen epätarkkuustekijät, joten tässä yhteydessä tarkastellaan vain suhteellisen kosteuden mittaustulosten luotettavuutta. Lämpötilamittaustulosten poikkeamat mittauksissa olivat varsin pieniä ja ne havaitaan suoraan myös suhteellisen kosteuden poikkeamina.

9.1.1 Rotronic AG:n laitteet

Laitevalmistaja lupaa mittalaitteilleen RH mittaustarkkuudeksi $\pm 0,8 \dots 1,0$ % RH tutkimuksen lämpötila-alueella. Ilmoitettu arvo ei kuitenkaan sisällä anturin hystereesiä ($< 0,5$ % RH), toistettavuudesta aiheutuvaa virhettä ($\pm 0,3$ % RH) tai pitkäaikaista stabiiliteettia ($< 1,0$ % RH/vuosi).

Suuri osa tutkimuksessa käytetyistä antureista oli uusia, joten pitkäaikaista stabiiliteettia ei niiltä osin tarvitse huomioida. Anturien säätö ja tarkistukset tehtiin samassa suunnassa kuin tutkimus eli korkeimmasta kosteudesta kohti matalampaa. Tästä johtuen myöskään mittapään hystereesin ei pitäisi olla merkittävä tekijä. Tällöin valmistajan ilmoittamista virhelähteistä jäävät jäljelle vain toistettavuudesta aiheutuva virhe ja mittaustarkkuuden perusarvo.

Koesarjoissa 50_2 ja 80_2 mittausolosuhteet poikkesivat kalibrointiolosuhteista merkittävästi, kun koekappaleet kuumennettiin 50 °C lämpötilaan. Kaikki muut mittaukset tehtiin mittalaitteiden kannalta optimialueella. Kuumennuksen vaikutusta mittaustarkkuuteen ei ole määritetty, koska valmistaja ei ole ilmoittanut mittaustarkkuuden lämpötilariippuvuutta. Arvioidaan mittaustulosten luotettavuutta erikseen näiden koesarjojen osalta liitteenä esitettyjen kattavampien mittaustulosten yhteydessä.

Kootaan taulukkoon 9.2 Rotronic laitteita koskevat mittausepävarmuuslähteet taulukosta 9.1.

Taulukko 9.2 Rotronic mittalaitteiden mittausepävarmuuslähteet taulukon 9.1 mukaisesti.

Mittausepävarmuuslähde	Vaikutus/suuruus
Mittalaitteen epälineaarisuus (systemaattinen)	Ei ilmoitettu, mutta sisältyy tutkimuksen tarkistusmittauksiin
RH mittapään hiipuma (systemaattinen)	< 1,0 % RH/vuosi
Mittapään hystereesi (satunnainen)	< 0,5 % RH
Kalibrointilämpötila (systemaattinen)	Sama kuin tutkimuksessa
Suolaliuoksen ominaisuudet (satunnainen)	Todennettu uusilla referenssiantureilla
Lämpötilamuutokset kalibroinnin aikana (satunnainen)	Säätö tehty lämpökaapissa, joten ei vaikutusta tarkkuuteen
Muut kalibroinnin aikana vaikuttavat tekijät (satunnainen)	Sisältyy tutkimuksen tarkistusmittauksiin
Kalibroinnin kokonaismittausepä tarkkuus (satunnainen)	Sisältyy tutkimuksen tarkistusmittauksiin
Mittaus eri lämpötilassa kuin kalibrointi (systemaattinen)	Sama kuin kalibroinnissa
RH mittapään säilytys kuivissa olosuhteissa (systemaattinen)	Säilytys huoneolosuhteissa

Kun kaikki virhelähteet huomioidaan, niin mittalaitteen laskennalliseksi kokonaisvirheeksi ilman pitkäaikaisstabiliteetin vaikutusta saadaan kaavan 9.1 perusteella:

$$S_{tot,Rotronic} = \sqrt{(\pm 0,8 \dots 1,0)^2 + (\pm 0,5)^2 + (\pm 0,3)^2} = \pm 1,0 \dots 1,2 \% RH$$

Tutkimuksessa käytetyille mittalaitteille tehtiin myös tarkistukset aina ennen tutkimusta ja tutkimuksen jälkeen. Tarkistusmittaukset tehtiin samoilla laitteilla ja vastaavilla järjestyksellä kuin Rotronic laitteiden säätö, mutta tarkistuksissa ei määritetty uusia korjauskeinoja antureiden mittaustulosten korjaamiseksi. Tarkistusmittauksissa kaikilla laitteistoilla kirjattiin mittaustuloksia minuutin välein noin kahden vuorokauden ajan ja mitattavaa olosuhdetta muutettiin noin 6...12 tunnin välein. Tarkistuksessa käytetyt olosuhteet muodostettiin samoilla suolaliuoksilla, joita oli käytetty myös antureiden säädössä.

Tarkistusmittaustuloksista määritettiin 3...6 h pituinen aikaväli jokaisen olosuhteen sellaiselta alueelta, jossa olosuhteet olivat varmasti tasaantuneet. Näistä aikaväleistä laskettiin jokaiselle anturille aikavälin mittaustulosten keskiarvo. Referenssiantureiden mittaustulosten keskiarvo määritettiin kolmen uuden anturin mittaustuloksista tarkasteltavalta aikaväliltä, jotta saatiin luku arvo kuvaamaan anturin mittaustuloksen virheen suuruutta. Näin määritettynä jokaista yksittäisen anturin mittaustulosten keskiarvoa verrattiin kolmen varmasti luotettavan anturin mittaustuloksen keskiarvoon. Kun kyseisen aikavä-

lin anturikohtaisten mittaustulosten keskiarvosta vähennetään referenssianturien keskiarvo, saadaan selville, kuinka paljon kyseisen anturin mittaustulos poikkeaa referenssianturien mittaamasta arvosta ja kumpaan suuntaan mittausrvirhe vaikuttaa.

Jaotellaan tutkimuksessa käytetyt mittalaitteet ryhmiin mittaustarkkuuteittain. Määritetään mittalaiteryhmän mittaustarkkuus laskemalla mittalaiteryhmään kuuluvien antureiden poikkeamien keskihajonta jokaisessa olosuhteessa. Ilmoitetaan mittalaiteryhmän mittaustarkkuus tutkimuksen jälkeen tehdystä jälkitarkistuksesta määritettynä, koska mittausta edeltävän keskihajonnan määrittäminen on työlästä ja arvo on todennäköisesti pienempi kuin tutkimuksen jälkeisistä tuloksista laskettuna.

Kootaan taulukkoon 9.3 jälkitarkistusmittausten perusteella määritetyt mittalaitteistoryhmien keskihajonnat. Määritellään mittalaiteryhmät seuraavasti:

- Mittalaiteryhmä Labra 1: Koesarjat 50_1, 50_2, 50_3 ja 80_2
- Mittalaiteryhmä Labra 2: Koesarjat 50_4, 80_1, 80_3
- Mittalaiteryhmä Kenttä 1: Mittauspisteet KE1_MP1 ja KE1_MP3
- Mittalaiteryhmä Kenttä 2_1: Mittauspisteet KE2_MP1...KE2_MP6
- Mittalaiteryhmä Kenttä 2_2: Mittauspisteet KE2_MP7...KE2_MP12

Taulukko 9.3 Tutkimuksessa käytettyjen Rotronic mittalaiteryhmien keskihajonta [%RH] mittaustarkkuuksittain. Tarkistusmittauksessa mittaustuloksia tallennettiin minuutin välein, joten keskiarvojen laskennassa käytettyjen pisteiden määrä on sama kuin aikavälin pituus.

Mittalaiteryhmä					Aikavälin pituus [min]
	< 50 %RH	50...70 %RH	70...90 %RH	> 90 %RH	< 50 ; 50...70 ; 70...90 ; > 90
Labra 1	0,9	1,3	1,6	1,7	300 ; 180 ; 180 ; 240
Labra 2	0,5	0,5	0,7	0,8	240 ; 360 ; 180 ; 360
Kenttä 1	0,2	0,5	0,8	0,8	240 ; 360 ; 180 ; 360
Kenttä 2_1	1,5	2,0	2,1	1,9	360 ; 360 ; 360 ; 360
Kenttä 2_2	1,1	1,5	2,3	2,4	360 ; 360 ; 360 ; 360

Tutkimustulosten luotettavuutta arvioitaessa käytetään mittaustarkkuutena valmistajan ilmoittamaa arvoa $\pm 1,0$ % RH tai tarkistusmittausten perusteella määritettyä arvoa, sen ollessa valmistajan ilmoittaman arvon itseisarvoa suurempi.

Koska mittalaiteryhmien mittaustarkkuus määritettiin keskihajontana, ryhmien sisällä on myös sellaisia antureita, joiden mittausrvirhe on taulukossa 9.3 ilmoitettuja arvoja suurempi. Anturikohtaiset poikkeamat esitetään liitteenä olevissa koesarjakohtaisissa tulokintakorteissa.

9.1.2 Wiiste Oy:n laitteet

Wiisteen laitteille ei tehty testauksia tai tarkistuksia, joten mittauksen luotettavuutta arvioidaan vain laitevalmistajan ilmoittamien tietojen perusteella. Laitevalmistaja lupaa mittalaitteilleen RH mittaustarkkuudeksi $\pm 2,5 \text{ \% RH}$, kun mitattava suhteellinen kosteus on alle 80 \% RH ja $\pm 2,5 \dots 4,0 \text{ \% RH}$, kun mitattava suhteellinen kosteus on yli 80 \% RH . Ilmoitettu arvo ei kuitenkaan sisällä anturin hystereesiä ($< 1,0 \text{ \% RH}$), lineaarisuusvirhettä ($< 1,0 \text{ \% RH}$), toistettavuudesta aiheutuvaa virhettä ($\pm 0,3 \text{ \% RH}$) tai pitkäaikaista stabiliteettia ($< 0,5 \text{ \% RH/vuosi}$). Kaikki tutkimuksessa käytetyt Wiisteen anturit olivat uusia, joten pitkäaikaista stabiliteettia ei niiltä osin tarvitse huomioida. Kootaan vielä taulukoon 9.4 Wiisteen koskevat mittausepävarmuuslähteet taulukosta 9.1.

Taulukko 9.4 Wiiste mittalaitteiden mittausepävarmuuslähteet, taulukon 9.1 mukaisesti.

Mittausepävarmuuslähde	Vaikutus/suuruus
Mittalaitteen epälineaarisuus (systemaattinen)	$< 1,0 \text{ \% RH}$
RH mittapään hiipuma (systemaattinen)	$< 1,0 \text{ \% RH/vuosi}$
Mittapään hystereesi (satunnainen)	$< 0,5 \text{ \% RH}$

Mittalaitteet toimitettiin suoraan tehtaalta, joten säilytyksestä ei aiheutunut erillistä mittausepävarmuutta. Mittalaitteet toimitettiin tehdaskalibroituina ja niitä käytettiin pääasiassa suositusmittausalueella. Koesarjoissa 50_2 ja 80_2 mittausolosuhteet poikkesivat suositusolosuhteista merkittävästi, kun koekappaleet kuumennettiin $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilaan, mutta tällöinkin pysyttiin ilmoitetun mittausalueen rajoissa.

Wiisteen laitteilla mitattuja tuloksia hyödynnetään ensisijaisesti laboratoriokoesarjojen vertailutarkasteluissa ja niiden tarkoituksena on varmentaa päämittausmenetelmällä mitattuja tuloksia. Kun kaikki virhelähteet huomioidaan, niin mittalaitteen laskennalliseksi kokonaisvirheeksi ilman pitkäaikaisstabiliteetin vaikutusta saadaan kaavan 9.1 perusteella:

$$S_{tot,Wiiste} = \sqrt{(\pm 2,5 \dots 4,0)^2 + (\pm 1,0)^2 + (\pm 1,0)^2 + (\pm 0,3)^2} = \pm 2,9 \dots 4,3 \text{ \% RH}$$

Tutkimustulosten luotettavuutta arvioitaessa käytetään mittaustarkkuutena valmistajan ilmoittamien mittausepävarmuuslähteiden perusteella määritettyä arvoa $\pm 2,9 \text{ \% RH}$, kun tarkastellaan alle 80 \% RH mitattuja suhteellisen kosteuden arvoja ja arvoa $\pm 4,3 \text{ \% RH}$, kun tarkastellaan yli 80 \% RH mitattuja suhteellisen kosteuden arvoja.

9.1.3 Vaisala Oyj:n laitteet

Laitevalmistaja lupaa mittalaitteilleen RH mittaustarkkuudeksi $\pm 2,0$ % RH, kun mitattava suhteellinen kosteus on alle 90 % RH ja $\pm 3,0$ % RH, kun mitattava suhteellinen kosteus on yli 90 % RH. Ilmoitettu arvo sisältää anturin hystereesin, lineaarisuusvirheen ja toistettavuudesta aiheutuvan virheen. Ilmoitettuun arvoon ei kuitenkaan sisälly pitkäaikaista stabiliteettia ($< 1,0$ % RH/vuosi). Ilmoitetun mittaustarkkuuden käyttö edellyttää yksilöllisten korjauskertoimien määrittystä jokaiselle mittapäälle.

Tutkimukseen varatut Vaisalan mittalaitteet olivat olleet varsin pitkään käytössä, joten pitkäaikaisen stabiliteetin vaikutuksesta tulisi erittäin merkittävä, jos sen vaikutus huomioidaan maksimiarvolla. Tästä syystä tähän tutkimukseen valittiin vain laitteet, joiden mittaustulosten todettiin vastaavan riittävällä tarkkuudella uusien Rotronic laitteiden mittaustuloksia. Näin tutkimukseen valittiin 16 HMP44 mittapään ja 3 HMI41 näyttölaitteen joukosta 8 luotettavimmaksi todettua mittapäätä ja 2 näyttölaitetta, luvussa 5.2.3 esitettyjen tarkistusmittausten perusteella. Valituille mittapäille määritettiin yksilölliset korjauskertoimet HMK15 kosteuskalibraattorilla. Kalibrointi tehtiin vakio-olosuhdehuoneessa, joten kalibroinnin aikaisella lämpötilan vaihtelulla ei ole vaikutusta tulosten luotettavuuteen. Kootaan taulukkoon 9.5 Vaisalan laitteita koskevat mittausepävarmuuslähteet taulukosta 9.1.

Taulukko 9.5 Vaisalan mittalaitteiden mittausepävarmuuslähteet taulukon 9.1 mukaisesti.

Mittausepävarmuuslähde	Vaikutus/suuruus
Mittalaitteen epälineaarisuus (systemaattinen)	Sisältyy perusarvoon
RH mittapään hiipuma (systemaattinen)	$< 1,0$ % RH/vuosi
Mittapään hystereesi (satunnainen)	Sisältyy perusarvoon
Kalibrointilämpötila (systemaattinen)	Sama kuin tutkimuksessa
Suolaliuoksen ominaisuudet (satunnainen)	Todennettu uusilla referenssi-antureilla ja käytetty valmiita
Lämpötilamuutokset kalibroinnin aikana (satunnainen)	Säätö tehty vakio-olosuhdehuoneessa, joten vaikutus pieni
Muut kalibroinnin aikana vaikuttavat tekijät (satunnainen)	Sisältyy tutkimuksen tarkistusmittauksiin
Kalibroinnin kokonaismittausepävarmuus (satunnainen)	Sisältyy tutkimuksen tarkistusmittauksiin
Mittaus eri lämpötilassa kuin kalibrointi (systemaattinen)	Sama kuin kalibroinnissa
RH mittapään säilytys kuivissa olosuhteissa (systemaattinen)	Säilytys huoneolosuhteissa

Kun kaikki virhelähteet huomioidaan, niin mittalaitteen laskennalliseksi kokonaisvirheeksi ilman pitkäaikaisstabiliteetin vaikutusta saadaan kaavan 9.1 perusteella:

$$S_{tot,Vaisala} = \sqrt{(\pm 2,0 \dots 3,0)^2} = \pm 2,0 \dots 3,0 \% RH$$

Myös Vaisalan laitteet testattiin ennen tutkimusta ja tutkimuksen jälkeen. Testauksessa käytettiin samoja olosuhteita, jotka oli muodostettu HMK15 kosteuskalibraattorin mittauskammioihin. Testauksessa kaikki tutkimuksessa käytetyt mittapäät tiivistettiin olosuhdeastiaan yhdessä referenssiarvoja tallentavan uuden Rotronic-laitteiston kanssa. Mittapäiden annettiin tasaantua jokaisessa olosuhteessa noin vuorokauden ajan, ennen kuin mittaustulokset luettiin. Kirjatulle mittaustulokselle haettiin vertailuarvoksi kolmen Rotronic anturin mittaustulosten keskiarvo samalta ajanhetkeltä. Kirjatusta mittaustuloksesta vähennettiin referenssiantureiden mittaustulosten keskiarvo, jolloin anturin mittaustuloksen poikkeaman suunta ja suuruus saatiin selville. Kaikkien 8 mittapään poikkeamien keskihajonnasta saadaan määritettyä tutkimuksessa käytetyille mittapäille mittaustarkkuus, joka on esitetty taulukossa 9.6. Tarkistusmittauksissa käytetyt olosuhteet olivat noin 97 % RH, noin 75 % RH ja noin 33 % RH. Jaotellaan mittaustarkkuudet taulukkoon tutkimuksen kannalta tarkoituksen mukaisesti.

Taulukko 9.6 Tutkimuksessa käytettyjen Vaisala mittalaiteryhmien keskihajonta [% RH] mittaustarkkuuksittain.

Mittalaiteryhmä	< 50 % RH	50...90 % RH	> 90 % RH
Vaisala	1,3	1,0	0,3

Erikoista on, että näin määritettynä Vaisalan laitteiden mittaustarkkuus on huomattavasti parempi matalassa suhteellisessa kosteudessa, vaikka yleensä tilanne on päinvastoin.

9.1.4 CEM instruments laitteet

CEM instruments laitteita käytettiin vain huoneolosuhteiden tallennukseen, joten mittaustulosten tarkkuudelle ei aseteta niin korkeita vaatimuksia. Laitevalmistaja ilmoittaa RH mittaustarkkuudeksi $\pm 3,0 \% RH$, kun mitattava suhteellinen kosteus on välillä 40...60 % RH, $\pm 3,5 \% RH$, kun mitattava suhteellinen kosteus on välillä 20...40 % RH tai 60...80 % RH ja $\pm 5,0 \% RH$, kun mitattava suhteellinen kosteus on välillä 10...20 % RH tai 80...100 % RH.

Laitteita on testattu aiempien tutkimusten yhteydessä ja tällöin laitevalmistajan ilmoittama mittaustarkkuus on saavutettu. Tutkimuksessa mitatut olosuhteet pysyivät pääosin noin 50 % RH suuruusluokassa, joten mittaustarkkuutena voidaan pitää valmistajan ilmoittamaa arvoa $\pm 3,0 \% RH$.

9.2 Epätarkkuustekijät koejärjestelyissä ja tutkimusmenetelmissä

Arvioidaan koejärjestelyistä ja tutkimusmenetelmistä aiheutuvan mittausvirheen suuruutta ohjekortin RT 14-10984 mukaisesti ja lisätään ohjekortin mukaiseen määrittelyyn tarvittaessa myös taulukossa 9.1 esitettyjä mittausepävarmuuslähteitä, joista useita on huomioitu jo mittalaitteen mittaustarkkuuden määrittelyn yhteydessä.

9.2.1 Laboratoriokokeet

Laboratoriokokeissa materiaalin huokosilman suhteellisen kosteuden mittaukseen käytettiin Rotronic AG:n ja Wiiste Oy:n laitteita. Laboratoriotutkimuksissa mittausten menetelminä käytettiin RT 14-10984 mukaisesti määriteltynä mittausta valuun asennettavista mittaussputkista sekä mittausta jatkuvasti materiaalin sisällä olevista antureista. Molemmat mittausten menetelmät määriteltiin luvussa 6 tarkoiksi mittausten menetelmiksi, vaikka ohjekortin mukaan ne ovat vain suuntaa-antavia. Määritetään laboratoriomittausten kokonaisepävarmuuteen vaikuttavat epätarkkuustekijät taulukkoon 9.7 mittalaitetyypeittäin ja -ryhmittäin.

Taulukko 9.7 Laboratoriotutkimukseen liittyvien mittausten epätarkkuustekijät.

Epätarkkuustekijä (suluissa RT 14-10984 mukaisen porareikämittauksen ohjearvon suuruus)	Epätarkkuuden suuruus mittalaiteryhmittäin tai -tyypeittäin [% RH-yks]		
	Labra 1	Labra 2	Wiiste
Mittalaitteen mittaustarkkuus alueella < 50 %RH	± 1,0	± 1,0	± 2,9
Mittalaitteen mittaustarkkuus alueella 50...70 %RH	± 1,3	± 1,0	± 2,9
Mittalaitteen mittaustarkkuus alueella 70...90 %RH	± 1,6	± 1,0	± 4,3
Mittalaitteen mittaustarkkuus alueella > 90 %RH	± 1,7	± 1,0	± 4,3
Kalibroinnin ja tarkistuksen tarkkuus (± 3 %RH)	± 1,5		0
Mittausreiän puhdistus (-4,0...+10 %RH)	± 0,5		0
Mittausputken tiivistys (0...-7 %RH)	± 0,5		± 0,5
Oikea mittaussyvyys (±10 %RH)	± 0,2		
Rakenteen lämpötila epänormaali (±10 %RH)	0		
Koesarjoissa 50_2 ja 80_2	± 2,0		
Lämpötilan muuttuminen mittauksen aikana	± 1,5		
Kosteuden kondensoituminen mittaussputkeen	± 1,5		
Lasketaan mittalaiteryhmien kokonaismittausepävarmuus kaavan 9.1 mukaisesti (suluissa olevaa arvoa käytetään koesarjojen 50_2 ja 80_2tulosten luotettavuuden arvioitiin)			
Kokonaismittausepävarmuus alueella < 50 %RH	± 2,9 (± 3,5)	± 2,9 (± 3,5)	± 3,6 (± 4,1)
Kokonaismittausepävarmuus alueella 50...70 %RH	± 3,0 (± 3,6)	± 2,9 (± 3,5)	± 3,6 (± 4,1)
Kokonaismittausepävarmuus alueella 70...90 %RH	± 3,1 (± 3,7)	± 2,9 (± 3,5)	± 4,8 (± 5,2)
Kokonaismittausepävarmuus alueella > 90 %RH	± 3,2 (± 3,8)	± 2,9 (± 3,5)	± 4,8 (± 5,2)

Taulukon 9.7 arvoja määritettäessä huomioitiin tarkistusmittausten ja valmistajan ilmoittamien tietojen vaikutus mittalaitteiden tarkkuuteen. Mittareiden puhdistuksen osalta huomioitiin tutkimuksen alkuvaiheessa tehty Rotronic antureiden asennus ja poistaminen, oikeaa asennushetkeä etsittäessä sekä mittauspukien imuroinnin vaikutus. Mittauspukien tiivistyksessä huomioitiin Rotronic mittauspukien alkuvaiheen teippausten vaikutus ja Wiisteen anturien osalta mahdollinen vuotoreitti mittauspukin ja rakenteen rajapinnassa. Mittaustulokset on ilmoitettu tarkoille syvyyksille, mutta mittalaitteiden asennuksessa on muutaman millin toleranssi, joten huomioidaan tästä aiheutuva pieni epävarmuus. Kuumennetuissa koesarjoissa mittalaitteiden mittaustarkkuuden oletetaan heikkenevän, vaikka sitä ei valmistajien ohjeissa ilmoiteta.

9.2.2 Kenttäkohde 1

Kenttäkohteella 1 rakenteen huokosilman suhteellista kosteutta mitattiin porareistä, joihin oli tiivistetty lämpöeristetyt mittauspuket. Menetelmä on määritelty ohjekortissa RT 14-10984 tarkaksi mittaamenetelmäksi. Määritetään kenttäkohteen 1 kokonaisepävarmuuteen vaikuttavat epätarkkuustekijät taulukkoon 9.8.

Taulukko 9.8 Kenttäkohteeseen 1 liittyvien mittausten epätarkkuustekijät.

Epätarkkuustekijä (suluissa RT 14-10984 mukaisen porareikämittauksen ohjearvon suuruus)	Epätarkkuuden suuruus [%RH-yks]
Mittalaitteen mittaustarkkuus koko mittausalueella	± 1,0
Kalibroinnin ja tarkistuksen tarkkuus (± 3 %RH)	± 1,5
Mittausreian puhdistus (-4,0...+10 %RH)	± 1,5
Mittausreian putkitus (0...-15 %RH)	± 1,5
Mittauspukin tiivistys (0...-7 %RH)	± 1,5
Oikea mittaussyvyys (±10 %RH)	± 1,5
Rakenteen ja yläpuolisen ilman välinen lämpötilaero (±15 %RH)	± 1,5
Mittaushetken lämpötila eri kuin käyttölämpötila	± 1,5
Lämpötilan muuttuminen mittauksen aikana	± 1,5
Kosteuden kondensoituminen mittauspukkeen	± 0,5
Mittausreian syvyyden vaihtelu	± 0,5
Väärin arvioitu rakenteen paksuus	± 1,5
Lasketaan mittalaiteryhmien kokonaismittauserävarmuus kaavan 9.1 mukaisesti	
Kokonaismittauserävarmuus koko mittausalueella	± 4,7

Taulukon 9.8 arvoja määritettäessä huomioitiin tarkistusmittausten ja valmistajan ilmoittamien tietojen vaikutus mittalaitteiden tarkkuuteen. Mittareiden puhdistuksen osalta huomioitiin, ettei reikää puhdistettu pulloharjalla, mutta reiät kuitenkin imuroitiin huolellisesti. Sähköputkesta valmistetut mittauspuket tiivistettiin rakenteeseen liimamassalla, mutta mittauspukia ei suojattu mekaaniselta rasitukselta. Huoneilman lämpötila seurasi

ulkoilman lämpötilaa, joten mittausputket lämpöeristettiin. Tästä huolimatta lämpötilan vaihtelulla saattaa olla vaikutusta tuloksiin. Poraussyvyys vakioitiin teräsputki-rajotilla, joten mittaussyvyyden vaihtelu ei ole suuri. Rakenteen paksuutta ei kuitenkaan tarkistettu mittauksen päättyessä, joten tästä saattaa aiheutua poikkeamia tuloksiin, etenkin kun valun paksuus on havaittu erittäin merkittäväksi kuivumisnopeuteen vaikuttavaksi tekijäksi.

9.2.3 Kenttäkohde 2

Kenttäkohteella 2 rakenteen huokosilman suhteellista kosteutta mitattiin porarei'istä, joihin oli tiivistetty lämpöeristetyt mittausputket. Tämän lisäksi kohteella tehtiin rinnakkaismittauksia lämpöeristämättömistä mittausputkista, jotka myös oli tiivistetty porareikiin. Määritetään kenttäkohteen 2 kokonaisepävarmuuteen vaikuttavat epätarkkuustekijät taulukkoon 9.9.

Taulukko 9.9 Kenttäkohteeseen 2 liittyvien mittausten epätarkkuustekijät.

Epätarkkuustekijä (suluissa RT 14-10984 mukaisen porareikämittauksen ohjearvon suuruus)	Epätarkkuuden suuruus mittalaiteryhmittäin tai -tyypeittäin [%RH-yks]		
	Kenttä 2_1	Kenttä 2_2	Vaisala
Mittalaitteen mittaustarkkuus alueella < 50 %RH	± 1,5	± 1,1	± 1,3
Mittalaitteen mittaustarkkuus alueella 50...70 %RH	± 2,0	± 1,5	± 1,0
Mittalaitteen mittaustarkkuus alueella 70...90 %RH	± 2,1	± 2,3	± 1,0
Mittalaitteen mittaustarkkuus alueella > 90 %RH	± 1,9	± 2,4	± 1,0
Kalibroinnin ja tarkistuksen tarkkuus (± 3 %RH)	± 1,5		± 1,5
Mittausreiän puhdistus (-4,0...+10 %RH)	± 1,0		
Mittausreiän putkitus (0...-15 %RH)	± 1,0		
Mittausputken tiivistys (0...-7 %RH)	± 3,0	± 1,5	
Mittapään tasaantumisaika (0...-15 %RH)	0		± 1,0
Oikea mittaussyvyys (±10 %RH)	± 0,2		
Rakenteen ja yläpuolisen ilman välinen lämpötilaero (±15 %RH)	± 1,0		± 1,5
RH mittapään kosteuskapasiteetti porareikässä	0		± 0,5
Lämpötilaero mittapään ja rakenteen välillä	0		± 0,5
Lämpötilan muuttuminen mittauksen aikana	± 1,5		± 0,5
Kosteuden kondensoituminen mittausputkeen	± 1,0		± 1,0
Mittausreiän syvyyden vaihtelu	± 0,5		
Lasketaan mittalaiteryhmien kokonaismittausepävarmuus kaavan 9.1 mukaisesti			
Kokonaismittausepävarmuus alueella < 50 %RH	± 4,5	± 3,5	± 3,7
Kokonaismittausepävarmuus alueella 50...70 %RH	± 4,7	± 3,6	± 3,6
Kokonaismittausepävarmuus alueella 70...90 %RH	± 4,7	± 4,0	± 3,6
Kokonaismittausepävarmuus alueella > 90 %RH	± 4,6	± 4,1	± 3,6

Taulukon 9.9 arvoja määritettäessä huomioitiin tarkistusmittausten ja valmistajan ilmoittamien tietojen vaikutus mittalaitteiden tarkkuuteen. Mittareiden puhdistuksen osalta huomioitiin, ettei reikää puhdistettu pulloharjalla, mutta reiät kuitenkin imuroitiin huolellisesti. Sähköputkesta valmistetut mittausputket tiivistettiin rakenteeseen liimamassalla, mutta mittausputkia ei suojattu mekaaniselta rasitukselta.

Mittauspisteissä MP1...MP6 tiivistys havaittiin vaurioituneeksi, mikä huomioitiin suuremmalla hajonnalla. Poraussyvyys vakioitiin teräsputkirajoittimilla, joten mittaussyvyyden vaihtelu ei ole suuri. Rakenteen paksuus tarkistettiin mittausten päättyessä kaikista porareistä.

Kondenssiriskin takia mittausputket lämpöeristettiin, mutta tutkimuksen aikana ei kuitenkaan havaittu viitteitä tästä. Tuuletuksen yhteydessä huoneilman lämpötilassa havaittiin kyllä muutoksia, mutta yksikään mittauspiste ei sijainnut sellaisessa tilassa, josta ikkunoita avattiin tuuletuksen ajaksi. Tästä huolimatta lämpötilan vaihtelulla saattaa olla vaikutusta tuloksiin.

Vaisalan mittalaitteet kuljetettiin vakio-olosuhdehuoneesta työmaalle hyvin suojattuna ja mittapäiden annettiin tasaantua huoneolosuhteisiin ennen mittausten aloitusta. Näin ollen mittapään lämpötilalla ja kosteuskapasiteetilla ei ole merkittävää vaikutusta.

10. TULOSTEN TULKINTA JA PÄÄTELMÄT

Mittaustulosten perusteella valun paksuus on tärkein yksittäinen tekijä, joka vaikuttaa kuivumisajan pituuteen. Lattialämmityksellä kuivumista pystyttiin nopeuttamaan, mutta tässä tutkimuksessa selkeitä eroja havaittiin vain kuumennetuissa koesarjoissa. Lattialämmityksen käyttö myös vaikutti rakenteeseen muodostuvaan kosteusjakaumaan.

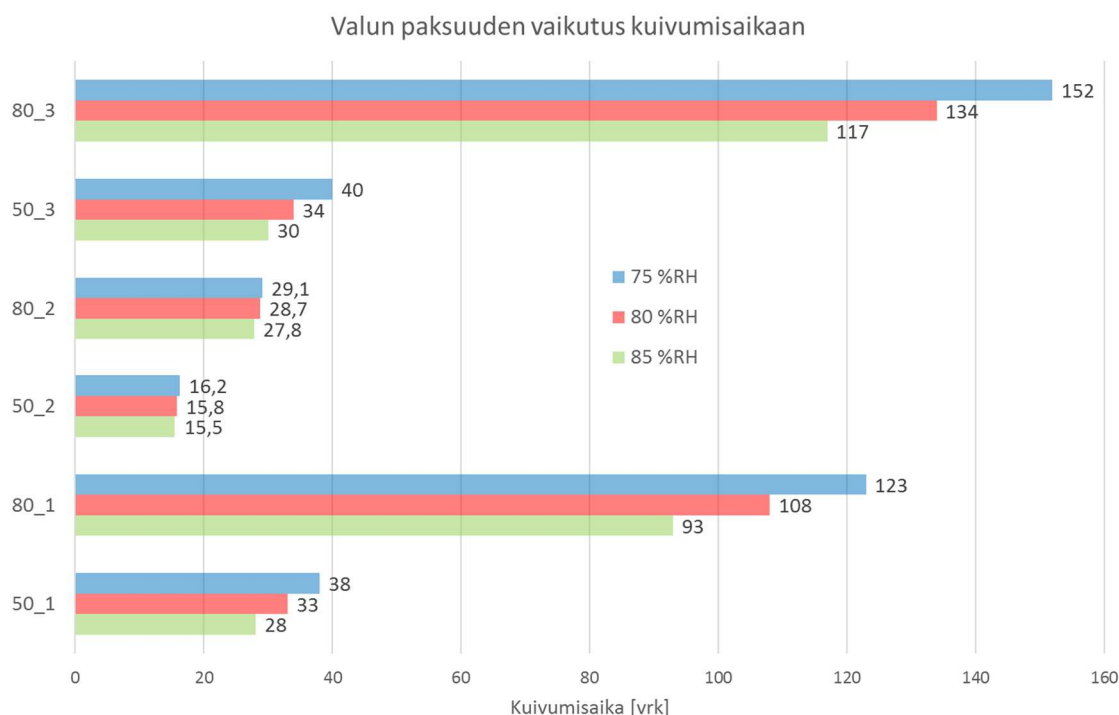
Ympäristöolosuhteiden ei tutkimuksessa havaittu vaikuttavan merkittävästi kuivumisnopeuteen. Laboratoriotutkimuksissa olosuhteita varioitiin vain yhden koesarjan osalta ja tällöinkin ainoa muutos oli 3 °C matalampi huoneilman lämpötila. Kenttätutkimuksissa olosuhteet vaihtelivat enemmän, mutta pysyivät materiaalin käytön kannalta tyypillisinä. Kipsimassalattiat valetaan yleensä rakennuksen ollessa lämmin, joten tutkimusolosuhteet vastasivat hyvin rakenteen todellisia käyttöolosuhteita.

Laboratoriotutkimuksissa suurin osa koekappaleista pinnoitettiin muovimatolla niiden saavutettua laskennallisen tavoitekosteuspitoisuuden. Pinnoituksen seurauksena havaittiin selkeä nousu mitatuissa huokosilman suhteellisen kosteuden arvoissa kaikissa mitauspisteissä.

Tarkastellaan seuraavaksi eri tekijöiden vaikutusta rakenteen kuivumiseen. Esitellään tässä yhteydessä tuloksia, joissa tarkasteltava ilmiö on selkeimmin havaittavissa ja esitetään loput tulokset tutkimuksen liitteinä. Luvun loppuksi muodostetaan suuntaa antava arvio rakenteen kuivumisnopeudesta

10.1 Valun paksuuden vaikutus kuivumisaikaan

Valun paksuuden vaikutusta kuivumisnopeuteen pystyttiin vertaamaan koesarjojen 50_1 ja 80_1, 50_2 ja 80_2 sekä 50_3 ja 80_3 välillä. Kaikissa tapauksissa paksummat koe-kappaleet kuivuivat hitaammin, mikä oli myös ennakko-odotus. Kuvassa 10.1 on esitetty vertailtavien koesarjojen kuivumisaajat eri tavoitekosteuspitoisuuksiin.

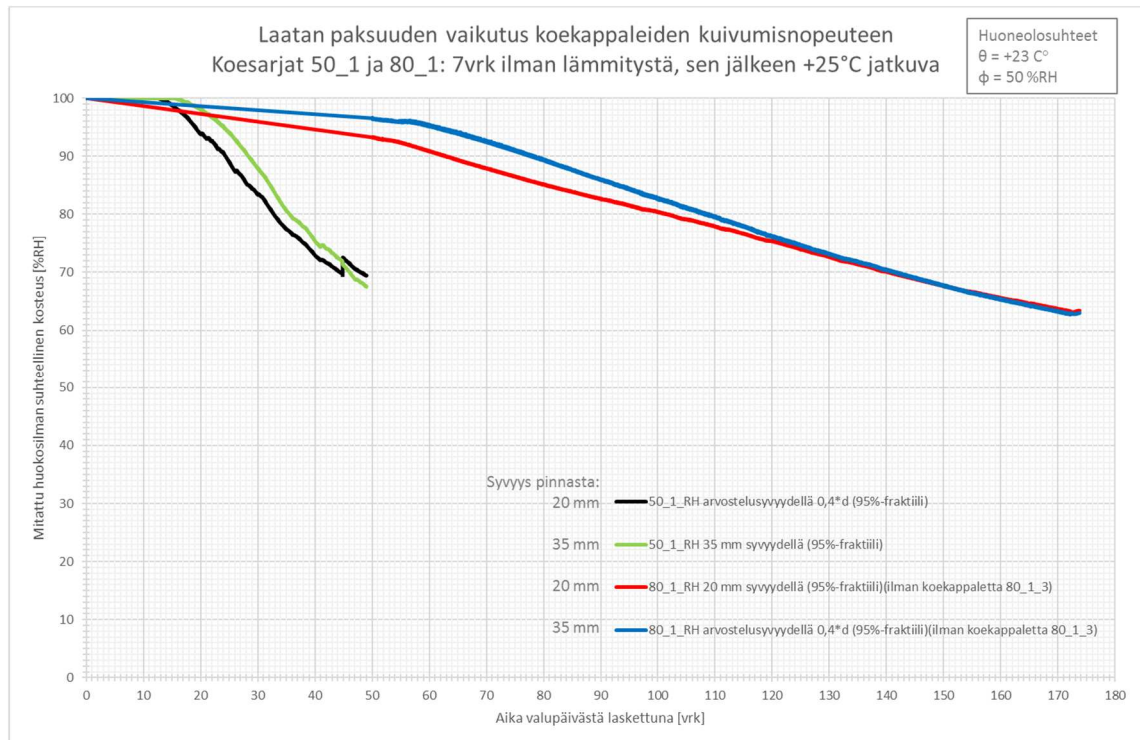


Kuva 10.1 Valun paksuuden vaikutus kuivumisaikaan.

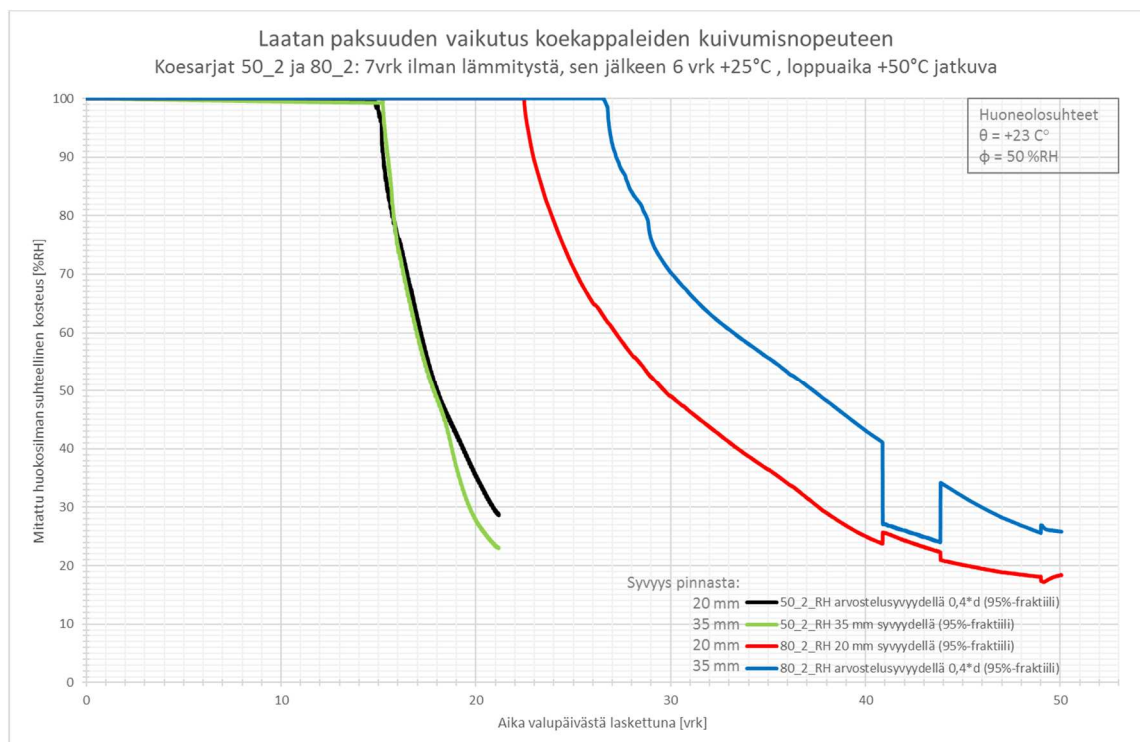
Kuvasta 10.1 havaitaan, että koesarjan 80_3 kuivumisaika oli lähes nelinkertainen verrattuna koesarjaan 50_3. Koesarjojen 80_1 ja 50_1 välillä ero oli yli kolminkertainen ja koesarjojen 80_2 ja 50_2 välillä noin kaksinkertainen.

Valun paksuuden vaikutus oli todella merkittävä, koska tutkimuksessa 60 % paksuuden lisäys on johtanut 200...400% pidempään kuivumisaikaan.

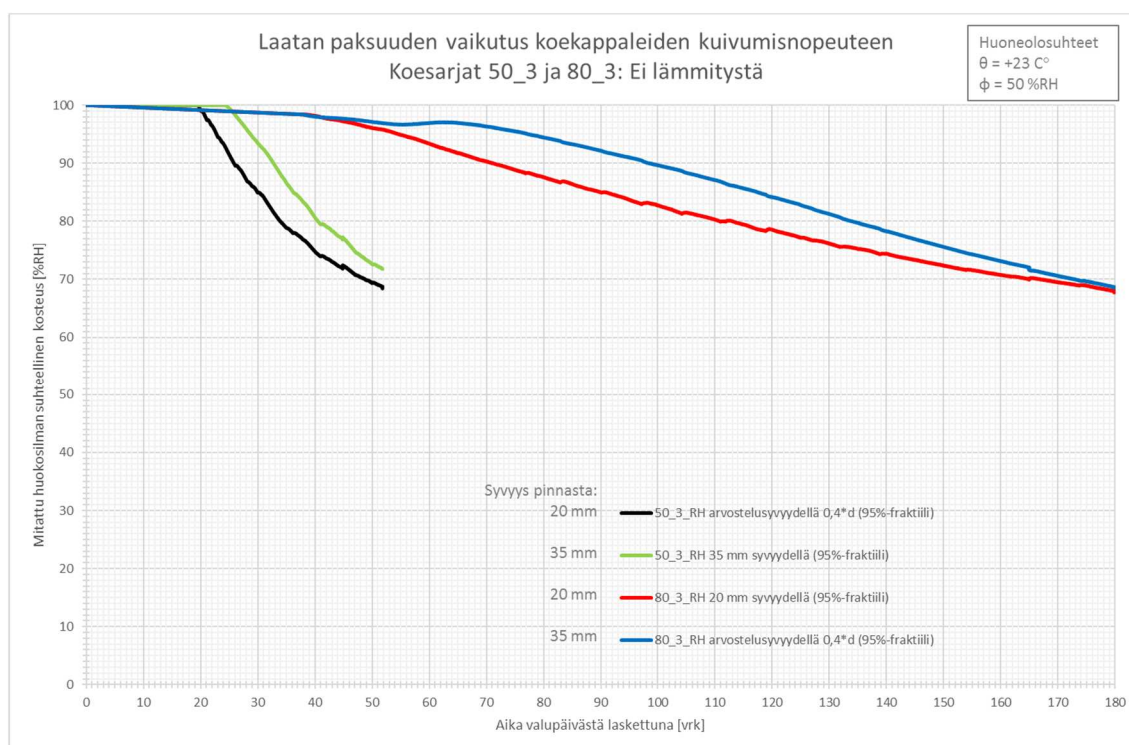
Kuvissa 10.2, 10.3 ja 10.4 on esitetty vertailtujen koesarjojen kuivumisaikojen 95 %-fraktiilin kuvaajat. Kuvista nähdään, että 50 mm koesarjojen huokosilman suhteellinen kosteus on alkanut laskea aiemmin ja pudotus on ollut jyrkempi kuin 80 mm koesarjoissa. Kuvassa 10.1 esitetyt kuivumisaajat on määritetty näistä kuvaajista.



Kuva 10.2 Koesarjojen 50_1 ja 80_1 kuivumiskäyrät 20 mm ja 35 mm syvyydeltä valun pinnasta.



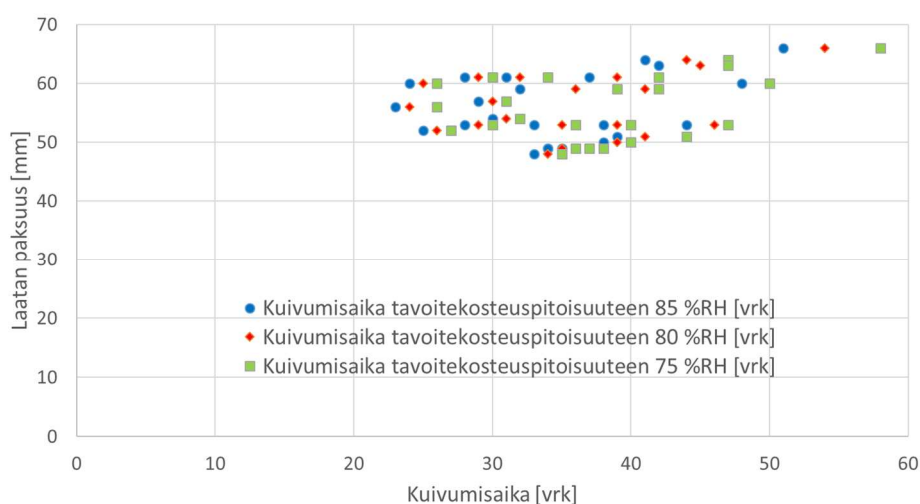
Kuva 10.3 Koesarjojen 50_2 ja 80_2 kuivumiskäyrät 20 mm ja 35 mm syvyydeltä valun pinnasta. Koesarjan 80_2 käyrissä välillä 41...44 vuorokautta valusta havaittava poikkeama johtuu koekappaleessa 80_2_3 olleen loggerin toimintahäiriöstä, jolloin kuivumiskäyrän 95 %-fraktiili pystyttiin laskemaan vain kahden kuivumiskäyrän perusteella.



Kuva 10.4 Koesarjojen 50_3 ja 80_3 kuivumiskäyrät 20 mm ja 35 mm syvyydeltä valun pinnasta.

Kenttäkohteella 1 valun paksuutta ei tarkistettu mittausten jälkeen, joten näistä mittaus-tuloksista ei saada tähän tarkasteluun vertailuarvoja. Korkomerkintöjen ja lähtötietojen perusteella valun paksuus oli 50 mm, joten yhteys koesarjaan 50_1 on olemassa.

Kenttäkohteella 2 jokaisessa mittauspisteessä kaikki neljä porareikää porattiin tutkimuk-sen päättyessä laatan läpi, askeläänieristeen yläpinnassa olevaan muovikalvoon asti. Aiemmin ilmoitettu laatan keskimääräinen paksuus on laskettu näiden 48 reiän mittaus-tuloksen keskiarvona. Kuvassa 10.5 on kohteelta mitatut valun paksuudet ja kuivumisaajat.



Kuva 10.5 Valun paksuuden ja kuivumisaajan välinen yhteys kenttäkohteella 2.

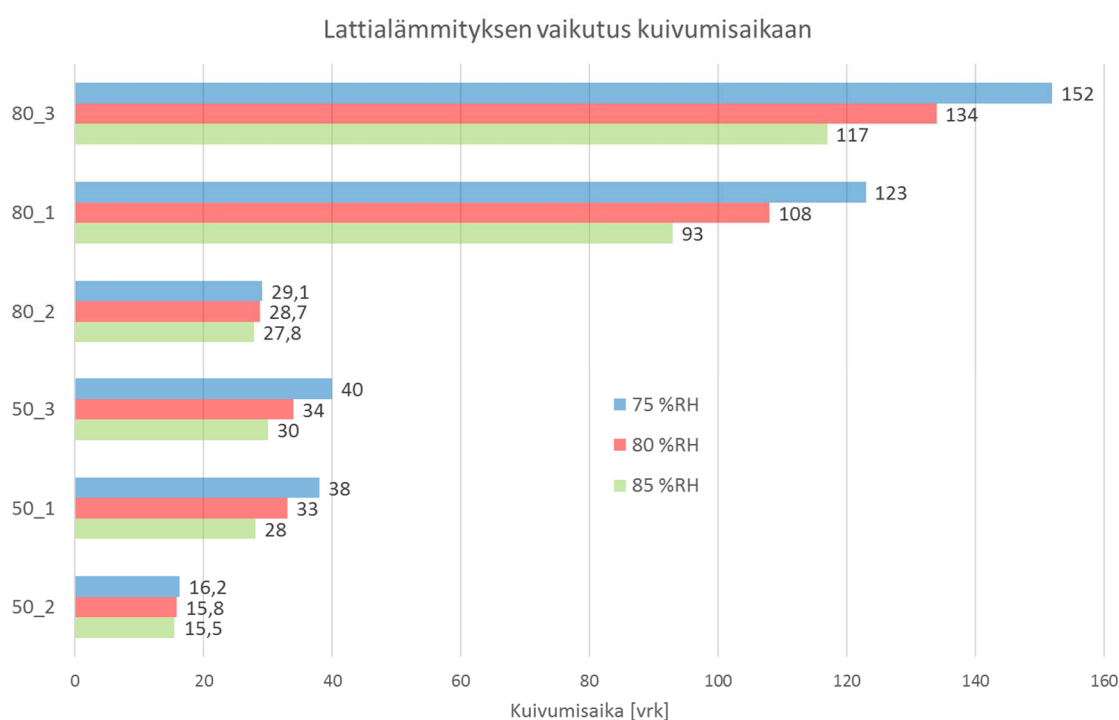
Taulukossa 10.1 on esitetty kenttäkohteen 2 pintalaatan kuivumisajat tavoitekosteuspitoisuuksiin 85 % RH, 80 % RH ja 75 % RH mittausputkikohtaisesti sekä laatan paksuus mittausputken kohdalla.

Taulukko 10.1 Laatan paksuudet ja tallentavan mittauksen mukaiset kuivumisajat tavoitekosteuspitoisuuksiin mittausputkittain kenttäkohteella 2.

Mittausputki (KE2_)	Laatan paksuus mittausputken kohdalla [mm]	Kuivumisaika tavoitekosteuspitoisuuteen 85 %RH [vrk]	Kuivumisaika tavoitekosteuspitoisuuteen 80 %RH [vrk]	Kuivumisaika tavoitekosteuspitoisuuteen 75 %RH [vrk]
MP1_R1	60	24	25	26
MP1_R2	61	28	29	30
MP2_R1	49	34	35	36
MP2_R2	50	38	39	40
MP3_R1	52	25	26	27
MP3_R2	53	28	29	30
MP4_R1	64	41	44	47
MP4_R2	66	51	54	58
MP5_R1	48	33	34	35
MP5_R2	49	35	36	37
MP6_R1	56	23	24	26
MP6_R2	57	29	30	31
MP7_R1	63	42	45	47
MP7_R2	60	48	50	>50
MP8_R1	49	34	36	38
MP8_R2	53	38	39	40
MP9_R1	61	31	32	34
MP9_R2	61	37	39	42
MP10_R1	59	32	36	39
MP10_R2	59	39	41	42
MP11_R1	51	39	41	44
MP11_R2	53	44	46	47
MP12_R1	54	30	31	32
MP12_R2	53	33	35	36

10.2 Lattialämmityksen vaikutus kuivumisaikaan

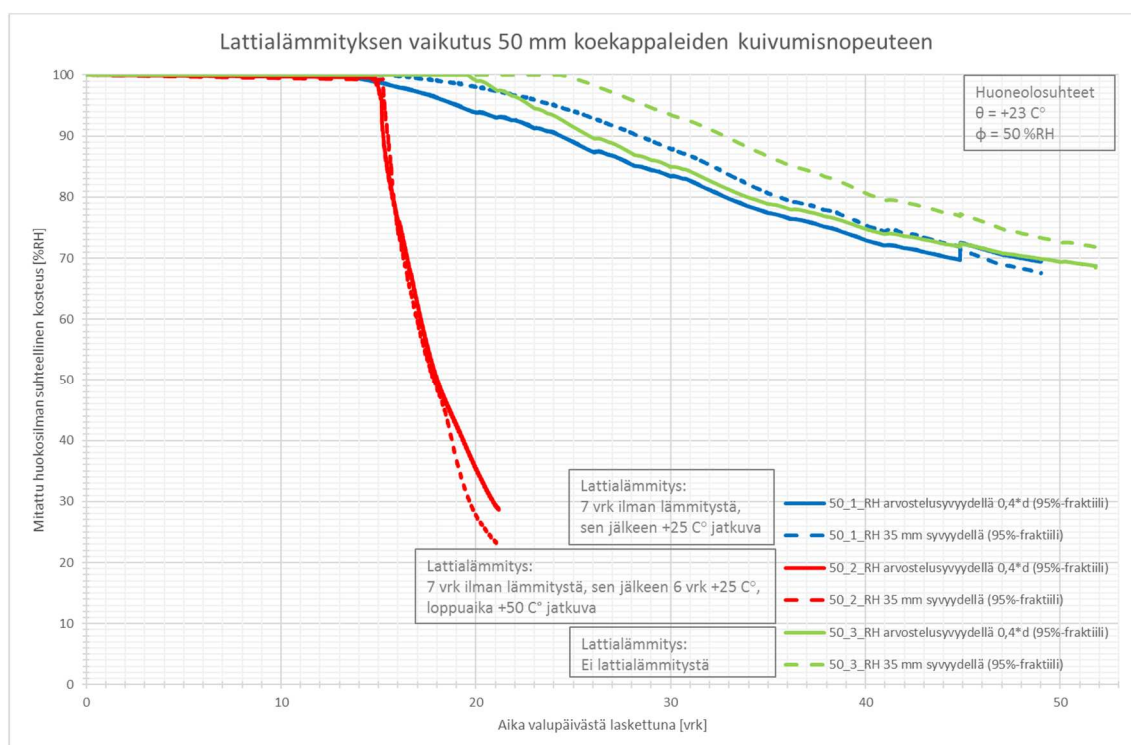
Laboratoriokokeissa lattialämmityksen vaikutusta kuivumisnopeuteen selvitettiin määrittämällä vertailukoesarjoille erilaiset lämpötilat ja lämmitysajat. Koesarjat 50_1 ja 80_1 lämmitettiin 25 °C lämpötilaan 7 vuorokauden kuluttua valusta, minkä jälkeen lämpötila pidettiin tasaisena tutkimuksen loppuun asti. Koesarjoissa 50_2 ja 80_2 lämmitys aloitettiin vastaavasti, mutta koesarjojen lämpötila nostettiin 50 °C lämpötilaan 13 vuorokauden kuluttua valusta. Laboratoriokokeissa oli lisäksi lämmittämättömät koesarjat 50_3 ja 80_3, joihin lämmitettyjen koesarjojen tuloksia pystyttiin vertaamaan. Vakio-olosuhdehuoneen lämpötila oli 23 °C, joten lämpötilaero jäi varsin pieneksi koesarjojen 50_1, 80_1, 50_3, 80_3 ja ympäristön välillä. Kuvassa 10.6 on esitetty lattialämmityksen vaikutus kuivumisaikaan.



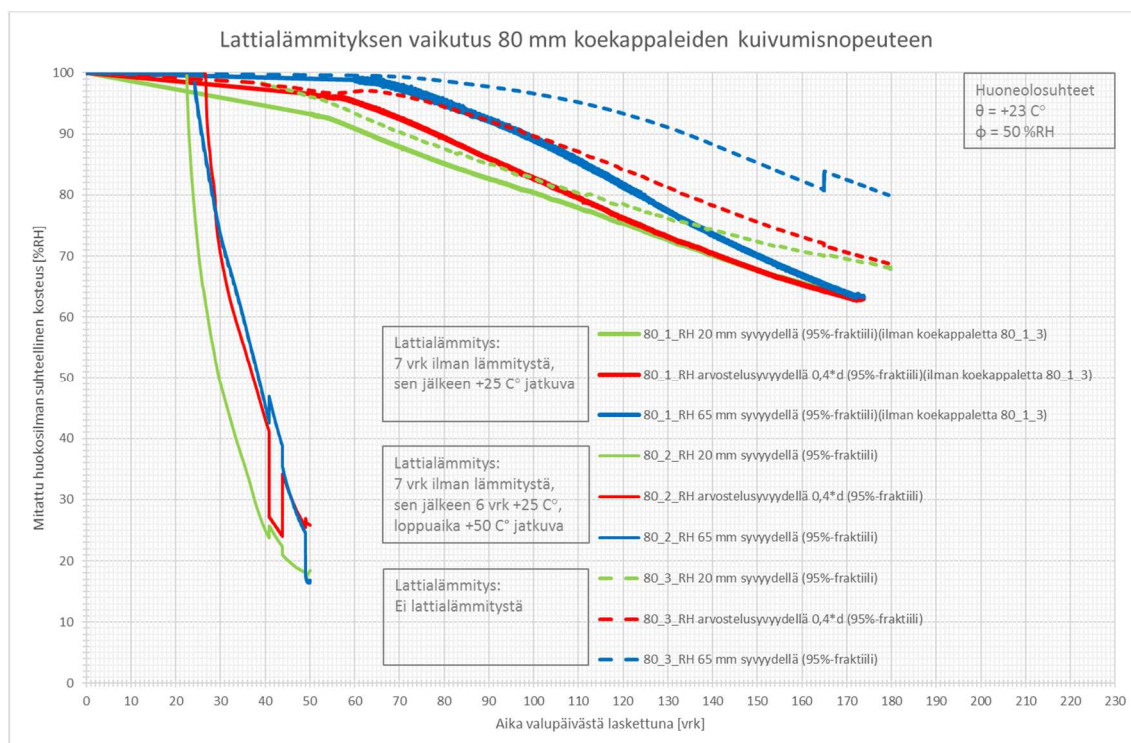
Kuva 10.6 Lattialämmityksen vaikutus kuivumisaikaan.

Kuvasta 10.6 havaitaan, että 50 mm paksuissa koekappaleissa lattialämmityksessä käytetty 25 °C lämpötila ei ole juurikaan vaikuttanut kuivumisaikaan. 80 mm koesarjoissa 25 °C lämpötila on lyhentänyt kuivumisaikaa noin 20 % verrattuna lämmittämättömään koesarjaan.

Rakenteen kuumentaminen 50 °C lämpötilaan sen sijaan lyhensi kuivumisaikoja merkittävästi. Erityisesti vaikutus havaittiin 80 mm koesarjoissa, joissa kuivumisaika verrattuna lämmittämättömään koesarjaan on lyhentynyt lähes 80 % kuumennuksen seurauksena. Myös 50 mm koesarjoissa ero on huomattava, kuivumisaikan lyhennyttyä 50 % verrattuna lämmittämättömään koesarjaan. Kuvissa 10.7 ja 10.8 on esitetty koesarjojen kuivumiskäyrien 95 %-fraktiliin, joiden mukaan kuvan 10.6 kuivumisaajat on määritetty.



Kuva 10.7 Koesarjojen 50_1, 50_2 ja 50_3 kuivumiskäyrien 95 %-fraktiilit 20 mm ja 35 mm syvyydeltä valun pinnasta. Lämmitys aloitettiin 7 vuorokauden kuluttua valusta ja kuumennus 13 vuorokauden kuluttua valusta. Koesarjaa 50_3 ei lämmitetty.



Kuva 10.8 Koesarjojen 80_1, 80_2 ja 80_3 kuivumiskäyrien 95 %-fraktiilit 20 mm, 35 mm ja 65 mm syvyydeltä valun pinnasta. Lämmitys aloitettiin 7 vuorokauden kuluttua valusta ja kuumennus 13 vuorokauden kuluttua valusta. Koesarjaa 80_3 ei lämmitetty.

Kuvista 10.7 ja 10.8 havaitaan, että lämmittämättömien ja 25 °C lämpötilaan lämmitettyjen koesarjojen kuivumiskuvaajat ovat hyvin saman muotoisia ja loivia. Sen sijaan kuumennettujen koesarjojen kuivumiskuvaajissa havaitaan jyrkkä pudotus, kun huokosilman suhteellinen kosteus laskee 100 % RH:sta alle 30 % RH:iin jopa muutamassa päivässä.

Koesarjan 50_2 huokosilman suhteellinen kosteus on lähtenyt jyrkkään laskuun 2 vuorokauden kuluttua lämpötilan nostosta. Koesarjan 80_2 tuloksissa vastaava pudotus havaitaan 9...14 vuorokauden kuluttua lämpötilan nostosta.

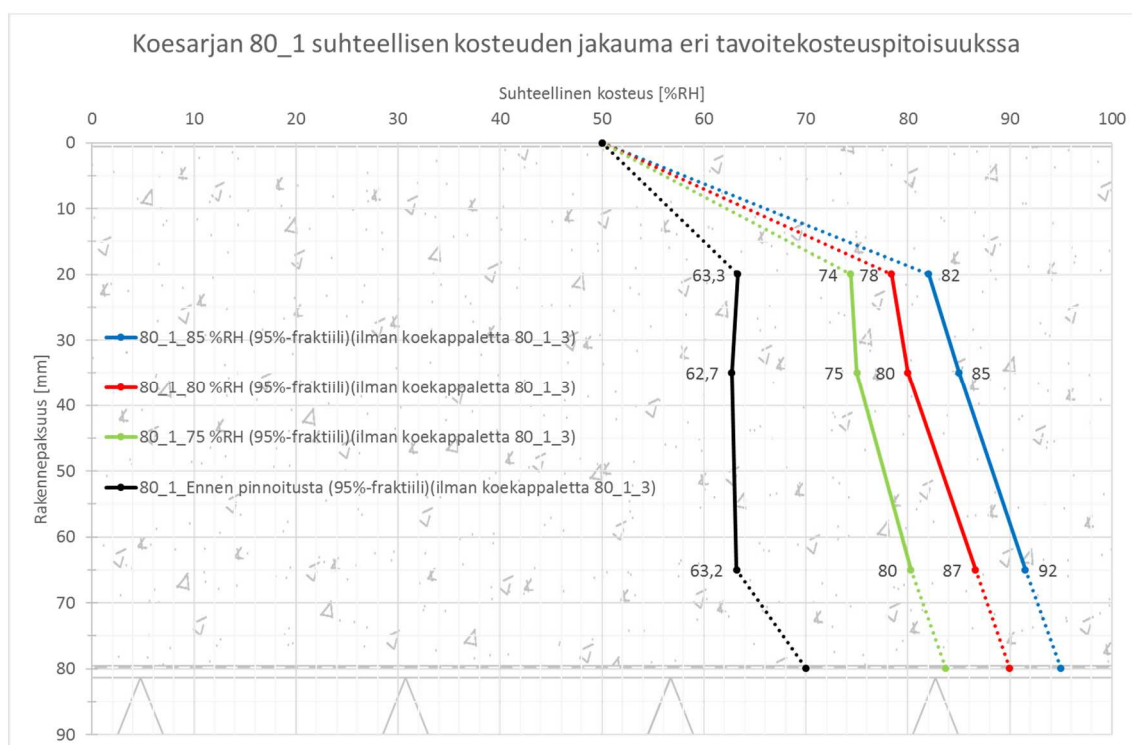
Tutkimussuunnitelmassa oli määritetty, että lämmitystä ja kuumennusta jatketaan tutkimuksen loppuun asti. Tässä tutkimuksessa koesarjan 50_1 lämmitys kytkettiin pois päältä, kun valusta oli kulunut 97 vuorokautta. Koesarjan 80_1 lämmitysjärjestelmä vaurioitui 172 vuorokauden kuluttua ja se olisi muutenkin sammutettu 195 vuorokauden kuluttua valusta. Koesarjan 50_2 kuumennusta jatkettiin siihen asti, kun valusta oli kulunut 64 vuorokautta ja koesarjan 80_2 kunnes valusta oli kulunut 92 vuorokautta.

Kun lämmitysjärjestelmät lopulta sammutettiin, kuumennetuissa koesarjoissa havaittiin 2...5 %RH pudotus huokosilman suhteellisen kosteuden arvoissa, mutta koesarjojen 50_1 ja 80_1 huokosilman suhteellisen kosteuden arvoissa lämmityksen katkaisua ei juurikaan havaittu. Tutkimuksessa ei selvitetty, kuinka huokosilman suhteellinen kosteus olisi muuttunut, jos koesarjojen lämmitys olisi kytketty pois päältä heti jyrkän pudotuksen jälkeen.

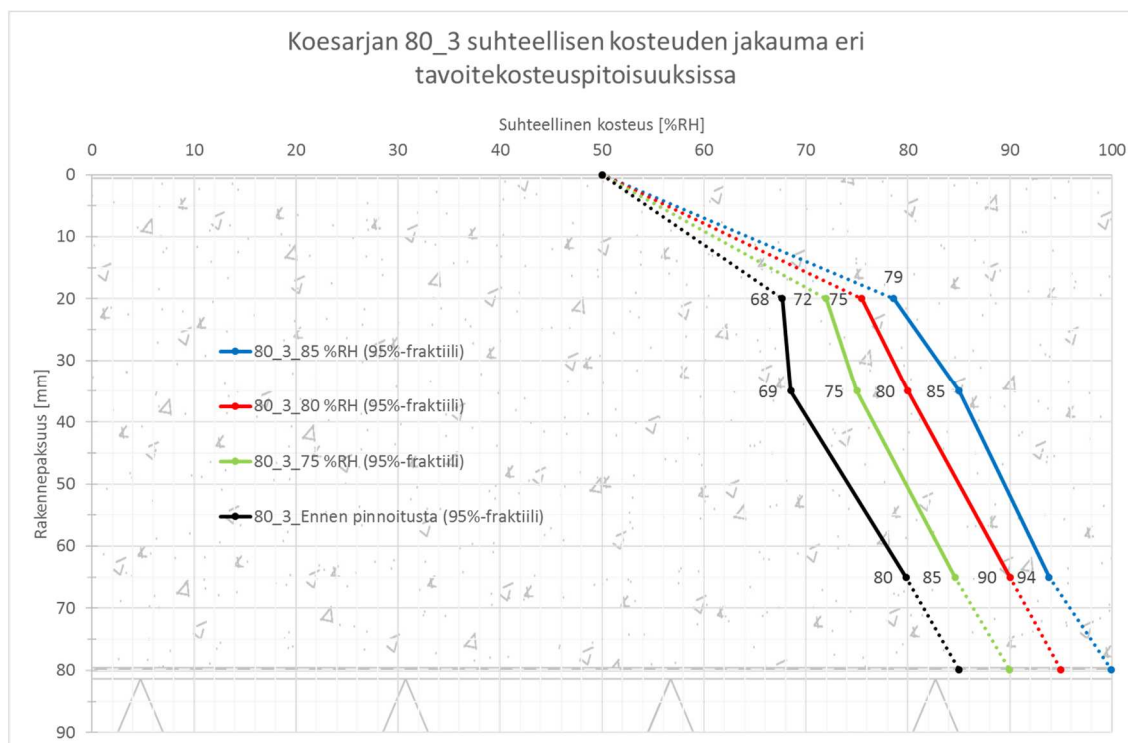
Lattialämmityksen havaittiin vaikuttaneen kuivumisnopeuden lisäksi myös rakenteen kosteusjakaumaan. Kuvissa 10.9 ja 10.10 on esitetty kosteusjakauma siltä hetkeltä, kun arvostelusyvyydellä 0,4*d on saavutettu tavoitekosteuspitoisuus 85 % RH, 80 % RH ja 75 % RH. Lisäksi on esitetty kuvaaja tilanteesta juuri ennen pinnoitusta.

Kuvia vertaamalla havaitaan, että lämmitetyn rakenteen kosteusjakauma on tasaisempi kuin lämmittämättömän. Tilanne havaitaan heti ensimmäisen tavoitekosteuspitoisuuden täytyessä ja tilanne on korostunut, kun rakennetta on kuivatettu edelleen. Kuvassa 10.9 esitetty ennen pinnoitusta vallinneen kosteusjakauman kuvaaja on jo lähes pystysuora, joten rakenteessa on vallinnut lähes sama huokosilman suhteellinen kosteus koko paksuuden matkalla.

Rakenteen pinnan tai pohjan suhteellista kosteutta ei mitattu. Kuvaajissa on oletettu, että rakenteen pinnalla huokosilman suhteellinen kosteus on tasapainossa ympäristön kanssa ja pohjalla olevaa huokosilman suhteellista kosteutta on arvioitu kuvaajien perusteella. Kuvissa on esitetty lukuarvoina vain mitatut tulokset.



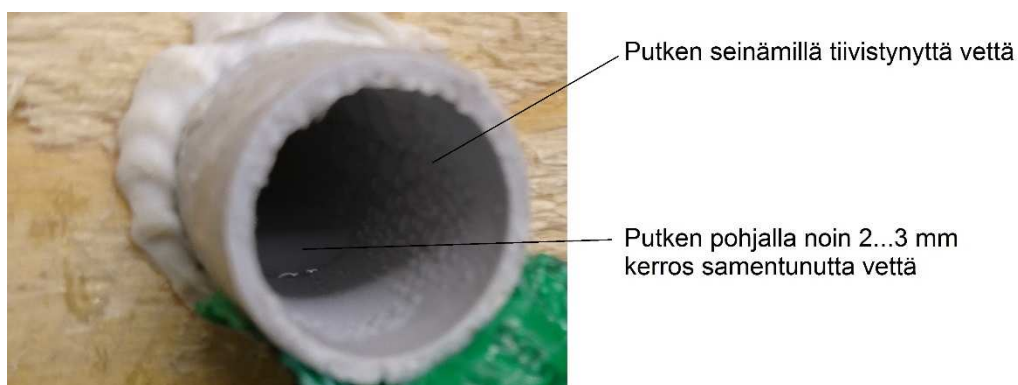
Kuva 10.9 Koesarjan 80_1 suhteellisen kosteuden jakauma rakenteessa, kun arvosteluvyydellä $0,4 \cdot d$ on saavutettu tavoitekosteuspuitoisuus. Kuvassa on esitetty mustalla viivalla myös kosteusjakauma juuri ennen koekappaleen pinnoitusta.



Kuva 10.10 Koesarjan 80_3 suhteellisen kosteuden jakauma rakenteessa, kun arvosteluvyydellä $0,4 \cdot d$ on saavutettu tavoitekosteuspuitoisuus. Kuvassa on esitetty mustalla viivalla myös kosteusjakauma juuri ennen koekappaleen pinnoitusta.

Vaikka laatan lämmittäminen onkin todettu useissa aihetta käsittelevissä lähteissä tehokkaimmaksi keinoksi nopeuttaa kuivumista, mikä pystytään vahvistamaan myös tämän tutkimuksen mittaus tuloksista, on rakenteen kuumentamista syytä harkita aina hieman tarkemmin. Kuumentamisella tarkoitetaan tässä yhteydessä koesarjojen 50_2 ja 80_2 muukaista lämmitystä, jolloin kosteus kyllä poistuu kuivatettavasta valusta nopeasti, mutta kosteuden poistumissuunta ei välttämättä ole hallittavissa.

Ilmiöstä saatiin viitteitä, kun koesarjan 80_2 mittausputkiin asennettiin antureita kuumentuksen jo alettua. Mittausputkien päät oli kuivumisen alkuvaiheessa suljettu tiiviisti höyrynsulkuteipillä ja kun putket avattiin anturien asennusta varten, havaittiin, että putkiin oli kertynyt runsaasti sameaa vettä. Vesi oli mitä ilmeisimmin tiivistynyt muotin ulkopuolella olevaan 20 mm pituiseen putken päähän ja höyrynsulkuteippiin, jotka olivat mittausputken viileimmät pinnat. Kuvassa 10.11 on esitetty havaittua kosteuden tiivistymistä.



Kuva 10.11 Koesarjan 80_2 mittausputkiin tiivistynyttä vettä. Putkessa ollut vesi todettiin sameaksi, mutta sameuden aiheuttajaa ei tutkittu tarkemmin, vaan vesi poistettiin mittausputkista imurilla, jossa oli mittausputkeen mahtuva ja pohjaan saakka yltävä suulake. Tutkimuksen tässä vaiheessa ei vielä tiedetty vesiliukoisen kipsin mahdollisesti aiheuttamasta kiteytymisvyöhykkeestä, joten vedestä ei otettu näytettä. On toki mahdollista, että sameuden on aiheuttanut liukoisten aineiden sijasta höyrynsulkuteipin liima tai mittausputken sisäpinnassa olleet epäpuhtaudet.

Runsas veden tiivistyminen mittausputkeen herätti ajatuksen; minne muualle vesi voi tiivistyä, jos se pakotetaan pois rakenteesta kuumentamalla? Kelluvan pintalaatan yhteydessä ensimmäisenä epäily kohdistui askeläänieristeen ja kantavan rakenteen väliin. Tässä rajapinnassa lämpötila on askeläänieristeen lämmönvastuksesta johtuen matalampi kuin pintalaatan alapinnassa, mutta kosteussisältö on kuitenkin todennäköisesti lähes yhtä suuri. Tämä kosteuslisä voi mahdollisesti olla kriittinen tekijä pinnoituksen kannalta esimerkiksi välipohjissa ontelolaattasaumojen tai matalaleukapalkkien kohdalla.

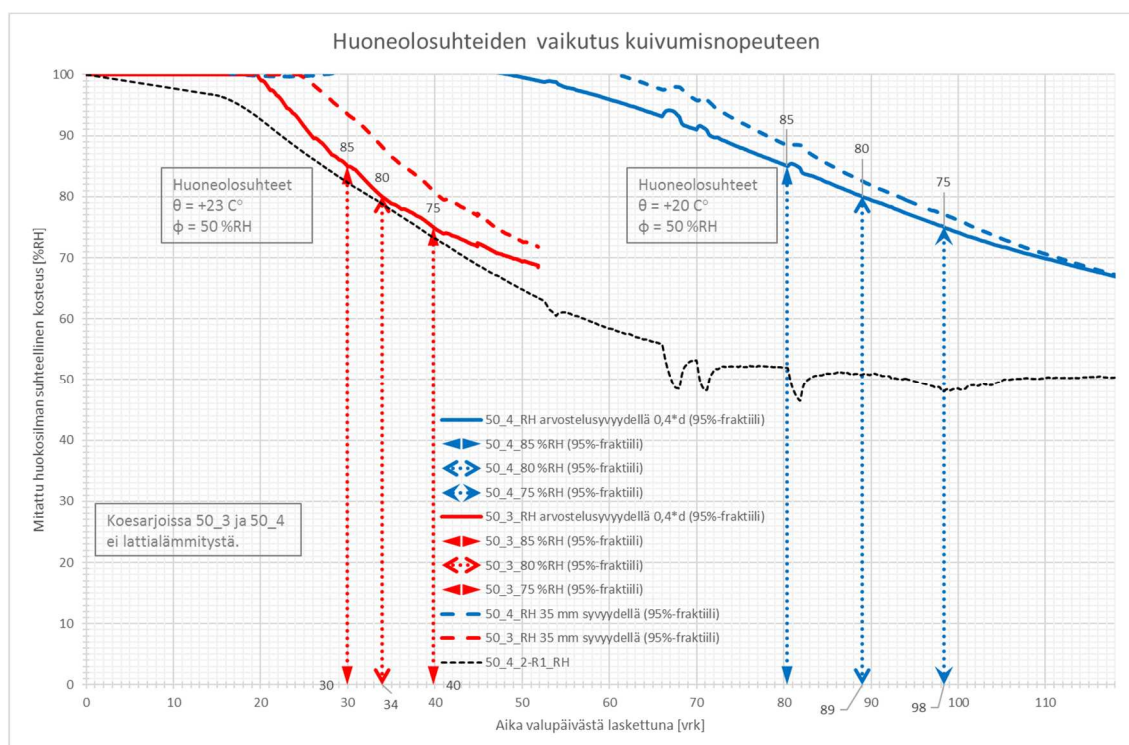
Mittaustulosten perusteella voidaan kuitenkin todeta, että laatan lämmitys nopeuttaa kuivumista huomattavasti ja saavutettava kuivumisajan säästö kasvaa sitä suuremmaksi, mitä paksummasta valusta on kyse.

10.3 Kuivumisolosuhteiden vaikutus kuivumisnopeuteen

Laboratoriokokeissa huoneolosuhteiden kannalta vertailukelpoisia koesarjoja olivat 50_3 ja 50_4. Koesarjoista molemmat olivat 50 mm paksuisia ja niitä ei ollut lämmitetty. Ainoastaan kuivumisolosuhteet ja koesarjojen valupäivä ovat toisistaan poikkeavat. Tutkimustuloksia tarkasteltaessa koesarjan 50_4 tutkimustuloksissa havaittiin virhelähde (ks. kuva 10.13), joka siirtää kuivumiskäyrän 95 %-fraktiilia huomattavasti eteenpäin.

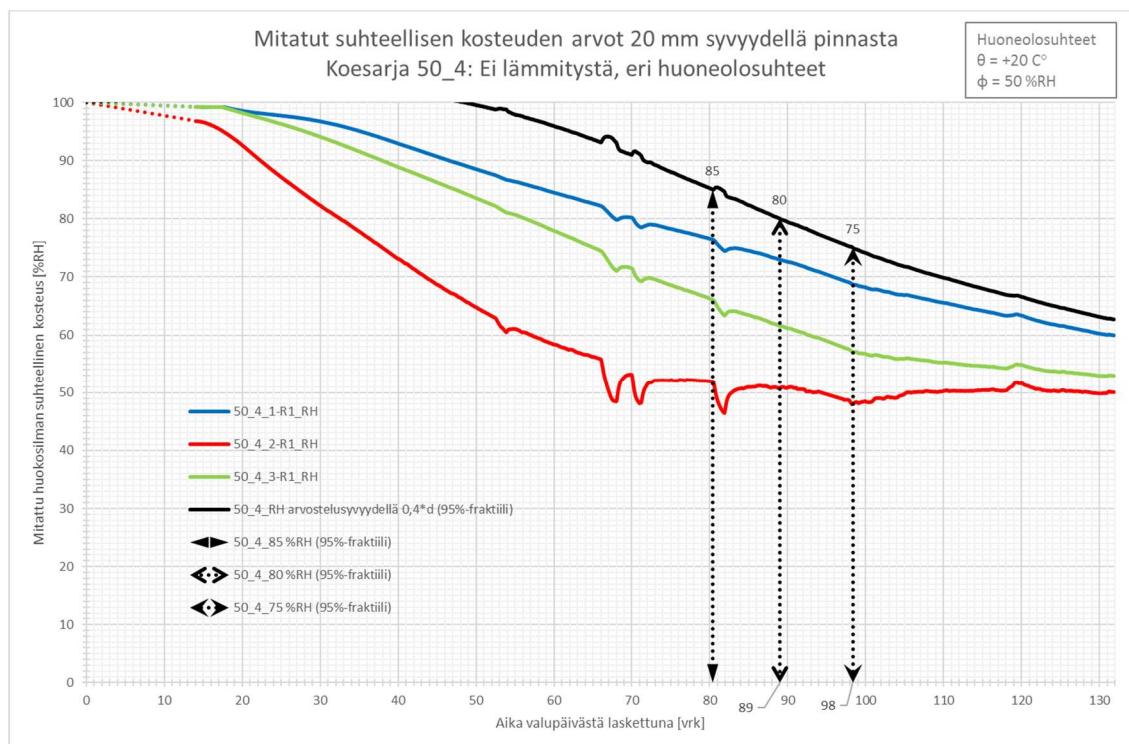
Tästä syystä laboratoriokokeiden perusteella ei pystytty luotettavasti osoittamaan huoneolosuhteiden vaikutusta kuivumisnopeuteen. Tuloksia tarkastelemalla oli silti mahdollista saada viitteitä siitä, mikä muu tekijä huoneolosuhteissa on vaikuttanut kuivumisnopeuteen suhteellisen kosteuden ja lämpötilan lisäksi.

Kuvassa 10.12 on esitetty koesarjojen 50_3 ja 50_4 kuivumiskäyrien 95 %-fraktiilit. Kuvasta havaitaan, että koesarja 50_4 on kuivunut huomattavan hitaasti verrattuna koesarjaan 50_3. Kuvassa on lisäksi esitetty mustalla katkoviivalla koekappaleen 50_4_2 kuivumiskäyrä, joka taas vastaa varsin hyvin koesarjan 50_3 kuivumiskäyrää. Tämän perusteella herää epäily, että jos yksittäinen kuvaaja vastaakin totuutta paremmin, kuin koesarjasta määritetty yhdistelmäkäyrä.



Kuva 10.12 Kuivumisolosuhteiden vaikutus kuivumisnopeuteen. Koesarjan 50_4 kuivumiskäyrän 95 %-fraktiilin kuvaajassa on kuitenkin vääristymä, joka kasvattaa kuivumisaikojen eroa. Koekappaleen 50_4_2 kuivumiskäyrä on esitetty kuvassa mustalla katkoviivalla ja se vastaa varsin hyvin koesarjan 50_3 kuivumiskäyrän 95%-fraktiilia alkuvaiheessa.

Kuvan 10.13 mukaisesti koesarjan koekappaleet 50_4_1 ja 50_4_3 ovat kuivuneet huomattavasti hitaammin kuin koekappale 50_4_2. Tämän perusteella voidaan olettaa, että kuivumisolosuhteissa on nyt muuttunut lämpötilan lisäksi joku muukin tekijä. Ilmeisimmäksi vaikuttavaksi tekijäksi osoittautui pohdintojen jälkeen eroavaisuudet koekappaleisiin kohdistuvissa ilmavirtauksissa.



Kuva 10.13 Koesarjan 50_4 kuivumiskäyrät 20 mm syvyydeltä mitattuna. Kuvaajista havaitaan, että koekappaleen 50_4_2 kuivuminen on ollut huomattavasti nopeampaa, kuin rinnakkaiskoekappaleiden. Kuivumisnopeuksien eroavaisuuden saattaa selittää eroavaisuudet koekappaleisiin kohdistuvissa ilmavirroissa. Huomion arvoista on, että koekappale 50_4_2 on saavuttanut tavoitekosteusarvoisuuden 85 % RH jo 27 vuorokauden kuluessa valusta, kun tähän on kulunut koekappaleelta 50_4_1 59 vuorokautta ja koekappaleella 50_4_3 47 vuorokautta. Kuvaajissa näkyvät pykälät ovat aiheutuneet vakio-olosuhdehuoneen laitteistohäiriöstä.

Koesarja 50_4 oli sijoitettuna vakio-olosuhdehuoneeseen pöydän alatasolle, huoneen perimmäiseen nurkkaan jolloin ilman vaihtuvuus on varmasti huonompi ja ilman virtausnopeus on ollut pienempi kuin ylähyllyllä. Lisäksi koekappaleet 50_4_1 ja 50_4_3 olivat nurkassa, jolloin niiden kohdalla ilman vaihtuvuus on todennäköisesti ollut vieläkin huonompaa ja virtaus hitaampaa kuin koekappaleen 50_4_2, joka oli käytävän kohdalla. Kuvassa 10.14 on esitetty koesarja 50_4 kuivumassa vakio-olosuhdehuoneessa.

Vakio-olosuhdehuoneissa tuloilma puhalletaan katossa olevien reikälevyjen läpi alas päin, jolloin käytävän kohdalla olevaan koekappaleeseen 50_4_2 on kohdistunut erittäin todennäköisesti suurempi ilmavirta kuin nurkassa oleviin koekappaleisiin.

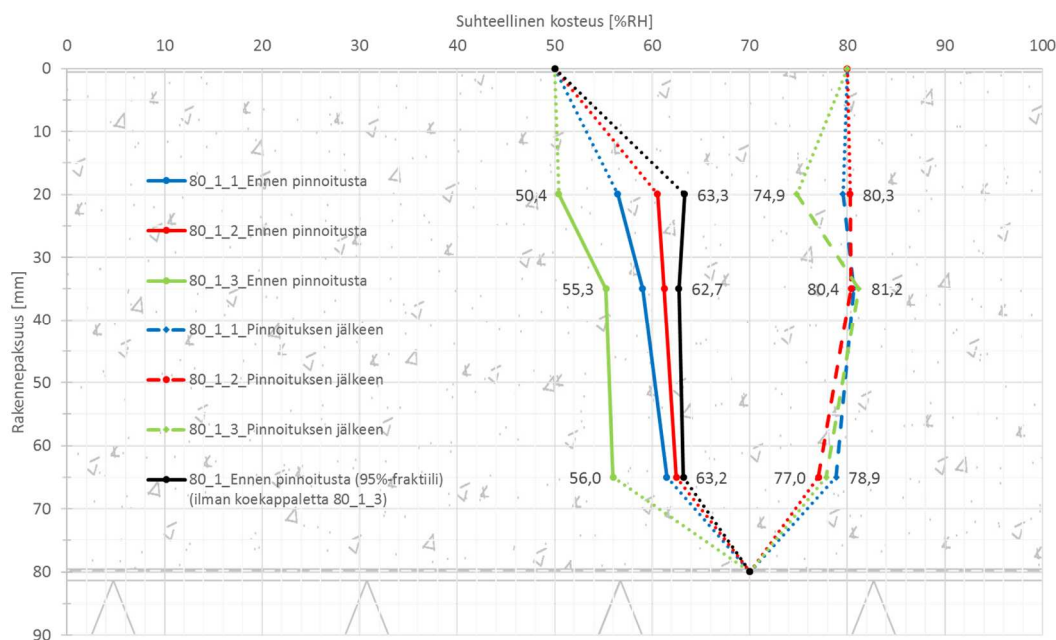


Kuva 10.14 Koesarja 50_4 kuivumassa vakio-olosuhdehuoneessa.

Toisessa vakio-olosuhdehuoneessa olleiden laboratoriokoesarjojen ilman vaihtuvuus ja virtaus oli varmistettu tuulettimilla, jotka siirsivät ilmaa koesarjojen pintojen suuntaisesti. Näin ollen muissa laboratoriokoesarjoissa koekappaleiden kuivumisolosuhteet ovat olleet vakiot sarjan sisällä.

10.4 Pinnoituksen vaikutus kosteusjakaumaan

Koesarjaa 50_4 lukuun ottamatta kaikki laboratoriokoekappaleet pinnoitettiin muovimallilla, kun tavoitekosteuspitoisuudet saavutettiin. Kuvassa 10.15 on esitetty pinnoituksen vaikutus koesarjan 80_1 suhteellisen kosteuden jakaumaan.



Kuva 10.15 Pinnoituksen vaikutus koesarjan 80_1 huokosilman suhteellisen kosteuden jakaumaan.

Kuvasta 10.15 havaitaan, että mittauspisteissä suhteellisen kosteuden arvo on noussut noin 25 % RH pinnoituksen jälkeen ja muutos on samaa suuruusluokkaa muiden koesarjojen kanssa. Yllättävää on, että suhteellinen kosteus on noussut koko poikkileikkauksessa tasaisesti, eikä vain valun pintaosissa.

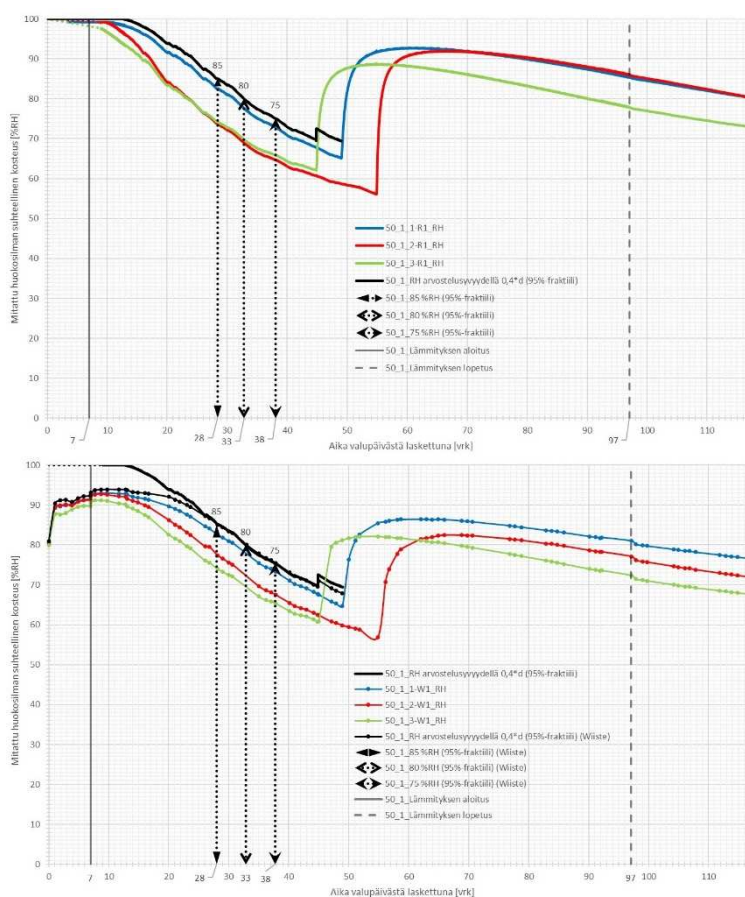
Yhdessäkään tutkituista koekappaleista suhteellinen ei noussut arvostelusyvytydellä 100 % RH asti, mutta kuitenkin yllättävän lähelle ottaen huomioon, että koekappaleita kuivatettiin kauemmin, kuin mittausten perusteella oli tarpeen. Suurin arvostelusyvytydeltä mitattu arvo (97 % RH) saatiin koekappaleesta 50_3_3, joka oli pinnoitettu 52 vuorokauden kuluttua valusta. Kyseinen koekappale pinnoitettiin tavoitekosteuspitoisuudessa 85 % RH.

Ilmiö on erittäin merkittävä ja poikkeaa esimerkiksi betonirakenteen kosteuskäyttäytymisestä pinnoitusyhteydessä. Kuvassa 2.14 esitetyssä arvostelusyvytyden määrittämisessä oletetaan, ettei huokosilman suhteellinen kosteus enää muutu arvostelusyvytydellä pinnoituksen jälkeen. Kuvassa 2.14 esitetyn teorian mukaan kosteusjakauman pitäisi tasoittua pinnoituksen jälkeen siten, että rakenteen pinnassa huokosilman suhteellinen kosteus nousee ja pohjalla laskee.

Havainnon perusteella onkin syytä pohtia, kuvaako arvostelusyvytydeltä $0,4 \cdot d$ mitattu suhteellisen kosteuden arvo kipsivalurakenteen pinnoitusvalmiutta? Mittaustuloksista ei pystytty selvittämään, mikä aiheuttaa näin merkittävän nousun huokosilman suhteelliseen kosteuteen ja miksi ilmiö vaikuttaa koko poikkileikkauksessa eikä vain pinnassa.

Pinnoituksen yhteydessä ainoa ulkoinen kosteuslähde oli mattoliima, jota käytettiin luvussa 7.1.4 kuvatulla tavalla noin 0,11 litraa jokaiseen pinnoitettavaan koekappaleeseen. Mattoliiman sisältämä vesimäärä on varsin pieni verrattuna koekappaleiden alkukosteuteen verrattuna, joten sen ei yksin pitäisi saada aikaan mittauksilla osoitettua muutosta. Koekappaleisiin massan valmistuksen yhteydessä lisätty vesimäärä oli 50 mm koekappaleissa noin 3,66 litraa ja 80 mm koekappaleissa noin 5,85 litraa.

Ilmiössä ei ole myöskään kyse mittalaitteiden tai mittausten menetelmän toiminnan puutteista, koska pinnoituksen välittömät vaikutukset havaitaan rinnakkaisilla mittausten menetelmillä yhtä voimakkaina ja saman aikaisesti. Kuvassa 10.16 on esitetty rinnakkaisten mittausten menetelmien tulokset koesarjasta 50_1. Samat kuvaaja on esitetty myös liitteissä.



Kuva 10.16 Mittaustulosten vertailu pinnoituksen yhteydessä. Ylemmässä kuvassa on esitetty Rotronic-laitteistoilla ja alemmassa kuvassa Wiiste-laitteistoilla mitatut kuivumiskuvaajat. Kuvaajista nähdään, että suhteellisen kosteuden nousu pinnoituksen jälkeen havaitaan molemmilla mittausten menetelmillä välittömästi ja yhtä voimakkaana.

10.5 Kelluvan Knauf LM80 kipsimassalattian kuivumisaika-arvio

Kenttäkohteella 2 oli 12 rinnakkaista mittaustulosta, joten näiden perusteella pystyttiin muodostamaan hyvin yksinkertainen kuivumisaika-arvio betonielementtirunkoisen kerrostalon kelluvan pintalaatan kuivumisesta kaavamuotoon. Mittaustulosten perusteella ei pystytty huomioimaan olosuhteiden vaikutusta tai valun paksuuden vaihtelua, mutta vaikuttaa siltä, että menetelmällä saadaan ainakin tässä kohteessa hieman varmalle puolelle meneviä arvioita. Kuvassa 10.16 on esitetty kuivumisaika-arvio kaavamuodossa.

Kuivumisaika-arvio kelluvalle Knauf LM80 pintalaatalle

Välipohjarakenne: Ontelolaatta 320 mm
Askeläänieriste (nystyrälevy)
Kelluva pintalaatta, jossa vesikiertoinen lattialämmitys

Knauf LM80 pintalaatan paksuus: $d = 50 \dots 60$ mm

Kuivumisolosuhteet: 20 °C
50 %RH
Lattialämmitys kytketään päälle 7 vrk kuluttua valusta

$Kuivumisaika = x * d$, missä
x = empiirisesti määritetty kuivumisaikakerroin
d = kelluvan pintalaatan paksuus

Kuivumisaikakertoimet tavoitekosteuspitoisuuteen 20 mm syvyydellä valun pinnasta

85 %RH: $x = 0,786$ vrk/mm
80 %RH: $x = 0,829$ vrk/mm
75 %RH: $x = 0,873$ vrk/mm

Kuivumisaikakertoimet tavoitekosteuspitoisuuteen 35 mm syvyydellä valun pinnasta

85 %RH: $x = 0,865$ vrk/mm
80 %RH: $x = 0,902$ vrk/mm
75 %RH: $x = 0,929$ vrk/mm

Kuva 10.16 Kelluvan pintalaatan kuivumisaika-arvio kenttäkohteen 2 mittaustulosten perusteella määritettynä.

Kuivumisaikakertoimet määritettiin kenttäkohteen 2 mittaustuloksista jakamalla kunkin anturin mittaustuloksista luettu kuivumisaika valun paksuudella, joka oli mitattu kyseisen mittausputken kohdalta. Näin määritetystä mittausputkikohtaisista kuivumisajoista laskettiin keskiarvo ja keskihajonta. Olettamalla kuivumisajan mittaustulokset normaalijakautuneiksi, pystyttiin tuloksista määrittämään kuivumisaika-arvion 95 %-fraktiili.

Kun kuivumisaikakertoimia testattiin kenttäkohteen 2 laatan keskiarvopaksuudella, havaittiin että saadut tulokset menevät muutaman vuorokauden varmalle puolelle verrattuna kummankin kenttäkohde 2 mittalaiteryhmän tuloksista määritettyyn kuivumiskäyrän 95 %-fraktiiliin. Kuvassa 10.17 on esitetty kuivumisaikakertoimien määrittäminen.

Mittaussyvytydellä 20 mm									
Mitattu paksuus ja kuivumisaajat				Kuivumisaika [vrk/mm]			Kuivumisaika-arvio [vrk]		
d [mm]	85 %RH	80 %RH	75 %RH	85 %RH	80 %RH	75 %RH	85 %RH	80 %RH	75 %RH
64	41	44	47	0,641	0,688	0,734	50,3	53,1	55,9
63	42	45	47	0,667	0,714	0,746	49,5	52,2	55,0
61	31	32	34	0,508	0,525	0,557	47,9	50,6	53,3
60	24	25	26	0,400	0,417	0,433	47,1	49,7	52,4
59	32	36	39	0,542	0,610	0,661	46,4	48,9	51,5
56	23	24	26	0,411	0,429	0,464	44,0	46,4	48,9
54	30	31	32	0,556	0,574	0,593	42,4	44,8	47,2
52	25	26	27	0,481	0,500	0,519	40,9	43,1	45,4
51	39	41	44	0,765	0,804	0,863	40,1	42,3	44,5
49	34	35	36	0,694	0,714	0,735	38,5	40,6	42,8
49	34	36	38	0,694	0,735	0,776	38,5	40,6	42,8
48	33	34	35	0,688	0,708	0,729	37,7	39,8	41,9
Mittaustulosten keskiarvo				0,587	0,618	0,651	vrk/mm		
Mittaustulosten keskihajonta				0,121	0,128	0,135	vrk/mm		
Mittaustulosten 95%-fraktiili				0,786	0,829	0,873	vrk/mm		

Mittaussyvytydellä 35 mm									
Mitattu paksuus ja kuivumisaajat				Kuivumisaika [vrk/mm]			Kuivumisaika-arvio [vrk]		
d [mm]	85 %RH	80 %RH	75 %RH	85 %RH	80 %RH	75 %RH	85 %RH	80 %RH	75 %RH
66	51	54	58	0,773	0,818	0,879	51,9	54,7	57,6
61	28	29	30	0,459	0,475	0,492	47,9	50,6	53,3
61	37	39	42	0,607	0,639	0,689	47,9	50,6	53,3
60	48	50	50	0,800	0,833	0,833	47,1	49,7	52,4
59	39	41	42	0,661	0,695	0,712	46,4	48,9	51,5
57	29	30	31	0,509	0,526	0,544	44,8	47,3	49,8
53	28	29	30	0,528	0,547	0,566	41,6	43,9	46,3
53	38	39	40	0,717	0,736	0,755	41,6	43,9	46,3
53	44	46	47	0,830	0,868	0,887	41,6	43,9	46,3
53	33	35	36	0,623	0,660	0,679	41,6	43,9	46,3
50	38	39	40	0,760	0,780	0,800	39,3	41,4	43,7
49	35	36	37	0,714	0,735	0,755	38,5	40,6	42,8
Mittaustulosten keskiarvo				0,665	0,693	0,716	vrk/mm		
Mittaustulosten keskihajonta				0,121	0,127	0,129	vrk/mm		
Mittaustulosten 95%-fraktiili				0,865	0,902	0,929	vrk/mm		

Valun paksuuden keskiarvo 55,875 mm
 Suurin valun paksuus 66 mm
 Pienin valun paksuus 48 mm

Kuva 10.17 Kelluvan pintalaatan kuivumisaikakertoimien määrittäminen kenttäkohteen 2 mitaustuloksista.

11. MAHDOLLISET JATKOTUTKIMUKSET

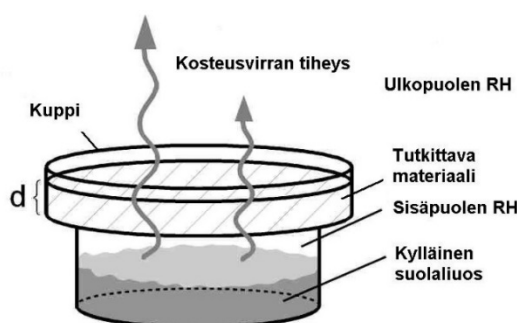
Rakennustuotannossa ja -tekniikassa ennakoitavuus on tavoiteltava ominaisuus kaikelle toiminnalle sekä rakenteille ja materiaaleille. Kaikkea ei enää nykyään tarvitse opetella yrityksen ja erehdyksen kautta, vaan tulevia tapahtumia voidaan pyrkiä ennakoimaan laskennallisilla tarkasteluilla. Laskentamenetelmien ja -työkalujen kehittyessä ilmiöitä pystytään mallintamaan aina vain tarkemmin ja tavoitteena onkin aina aikaansaada mahdollisimman hyvä kuvaus todellisesta, luonnossa tapahtuvasta ilmiöstä. Rakenteiden laskentatarkasteluissa lähtötietoina on tunnettava vallitsevat olosuhteet ja niiden ajasta riippuvat muutokset sekä tietysti tutkittavan rakenteen materiaaliominaisuudet mahdollisimman kattavasti ja tarkasti. Seuraavaksi määritellään materiaaliominaisuuksia, jotka Knauf LM80 lattiamassasta olisi hyvä tuntea, jotta laskentatarkasteluja pystytään tekemään. Lisäksi esitellään aiempiin tutkimuksiin perustuen, millaisia laskentatarkasteluja rakenteen kuivumisesta olisi mahdollista tehdä.

11.1 Materiaaliominaisuuksien määrittäminen

Knauf LM80 lattiamassasta tunnetaan kattavasti lujuusominaisuuksia sekä muita valmiin rakenteen toimintaan vaikuttavia tekijöitä. Materiaalin rakennusfysikaalisia ominaisuuksia ei kuitenkaan tunneta juuri ollenkaan ja niiden selvittäminen olisi laskennallisten tarkastelujen kannalta oleellista.

Materiaalista olisi syytä selvittää ainakin hygroskooppisen (kuva 2.9) sekä kapillaarisen (kuva 2.10) alueen tasapainokosteuskäyrät adsorptio ja desorptio tilanteessa. Hygroskooppisella alueella käyrät voidaan määrittää punnitus-kuivaus -menetelmällä ja kapillaarisella alueella painelevymenetelmällä. (Vinha 2014 s.349-350, Vinha *et al.* 2005 s.44-45)

Toisena erittäin oleellisena tietona olisi selvitettävä materiaalin vesihöyrynläpäisevyys δ_v tai δ_p . Rakenteen kuivumistutkimuksen kannalta oleellinen vesihöyrynläpäisevyys voidaan määrittää märkäkuppikokeen menetelmällä (kuva 11.1).



Kuva 11.1 Märkäkuppikokeen periaate (Vinha 2014 s.351).

Märkäkuppikokeessa materiaalikoe-kappale toimii kupin ”kantena”. Kupin sisä- ja ulkopuolella on sama vakiolämpötila, mutta sisäpuolella on korkeampi suhteellinen kosteus, jolloin kupista alkaa poistua vesihöyryä diffuusiolla materiaalikoe-kappaleen läpi. Säännöllisillä punnituksilla voidaan määrittää kupista poistuvan kosteusvirran tiheys $g [kg/(m^2s)]$, josta voidaan laskea materiaalin vesihöyrynläpäisevyys. (Vinha 2014 s.351, Vinha *et al.* 2005 s.63-65)

Luvussa 3.1 kerrottiin kipsin kuivumiseen liittyvästä kiteytymisvyöhykkeestä. Kiteytymisvyöhykkeen muodostumista LM80 lattiassa voisi tutkia varioimalla märkäkuppikokeessa käytettävää materiaalikoe-kappaletta. Lähteessä (M.D. Seck *et al.* 2015) kerrottiin, että mitä paksumpi rakenne on kyseessä, sitä paksumpi kiteytymisvyöhyke materiaalin pintaan muodostuu. Näin ollen LM80 lattiassa voisi valaa esimerkiksi 150...200 mm paksun lieriökoe-kappaleen, joka kuivuu vain toisesta päästään. Kun koe-kappaleen paino ei enää muutu, sahataan koe-kappaleen päästä sopivan paksu siivu märkäkuppikoetta varten. Sahattavan siivun paksuuden tulisi standardin SFS-EN ISO 12572 (2016) mukaan olla 3...5 kertaa massan suurin raekoko, eli LM80 massan suurimman raekoon ollessa 4 mm, sopiva siivun paksuus olisi 15 mm (12...20 mm).

Vertailukoe-kappaleina voisivat toimia suoraan oikeaan paksuuteen (15 mm) valettu käsittelemätön koe-kappale, noin 50...80 mm paksuna valetusta lieriöstä sahattu koe-kappale, jonka pintaa ei hiota sekä noin 50...80 mm paksuna valetusta lieriöstä sahattu koe-kappale, jonka pinta hiotaan auki.

Kosteusominaisuuksista laskennallisten tarkastelujen lähtötiedoiksi tarvitaan myös veden imeytymiskerroin $A_w [kg/(m^2s^{0.5})]$, vedentunkeutumiskerroin $B_w [m/s^{0.5}]$ sekä kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus $w_{cap} [kg/m^3]$, joka voidaan määrittää veden imeytymiskertoimen määrittämisen yhteydessä tai vesiupotuksella. Selvitettävä on myös maksimikosteuspitoisuus $w_{max} [kg/m^3]$, joka voidaan selvittää esimerkiksi vakuumikyllästyskokeessa. Maksimikosteuspitoisuuden avulla voidaan määrittää myös materiaalin huokoisuus. (Vinha 2014 s.352-354)

Lattialämmitettyjen rakenteiden laskennallisia tarkasteluja varten olisi tunnettava myös materiaalin lämmönjohtavuus $\lambda [W/(mK)]$ eri kosteuspitoisuuksissa sekä materiaalin ominaislämpökapasiteetti $c_p [J/(kgK)]$. Ominaislämpökapasiteetti voidaan määrittää esimerkiksi kalorimetrissä ja lämmönjohtavuus lämpövirtalevyllä. (Vinha 2014 s.344-346, Vinha *et al.* 2005 s.22-30)

Näiden laboratoriokokeilla selvitettyjen materiaaliominaisuuksien perusteella pystytään määrittämään laskennallisesti muita johdannaissuureita. Määritettäviä johdannaissuureita ovat muun muassa terminen diffusiviteetti $a [m^2/s]$, joka kertoo, kuinka nopeasti lämpötilanmuutokset tapahtuva materiaalissa sekä edellisen kanssa analoginen kosteusdiffusi-

viteetti D_w , joka kuvaa sitä, kuinka nopeasti materiaalin tasapainokosteus saavuttaa tasapainotilanteen olosuhteiden muuttuessa. (Vinha 2014 s.344-345 ja 355-356, Vinha *et al.* 2005 s.92-94, Vinha 2011a s.195, Vinha 2011b s.101-102, Leivo & Rantala 2002 s.17)

Muita jatkotutkimukseen soveltuvia materiaalikokeita ovat vesihöyrynläpäisevyyden määrittäminen kuivakuppimenetelmällä, jolla selvitetään vesihöyrynläpäisevyyttä matalissa kosteuspitoisuuksissa sekä kapillaarisen nousukorkeuden h_{cap} [m] määrittäminen.

11.2 Kuivumisen laskennallinen tarkastelu

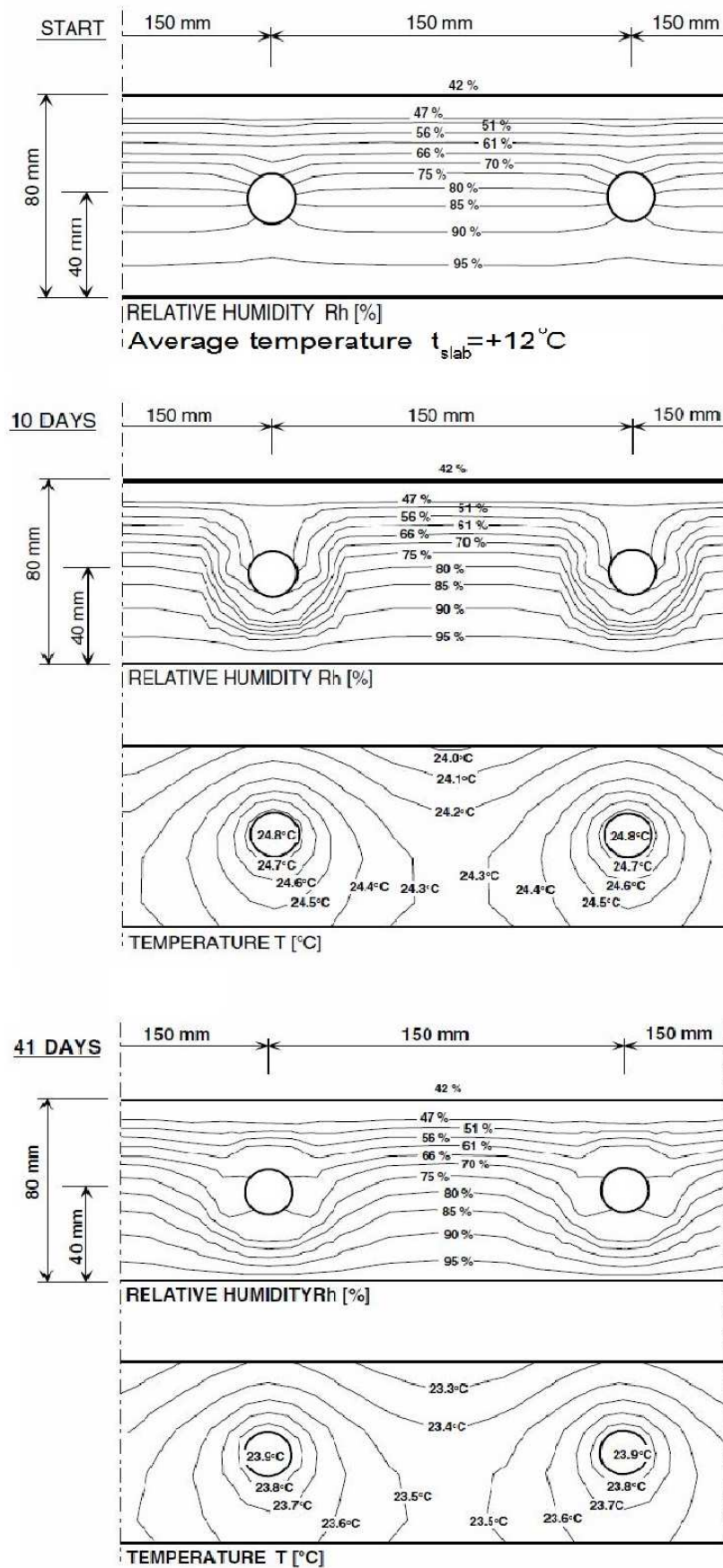
Kun Knauf LM80 lattiamassan materiaaliominaisuudet tunnetaan tarkasti, voidaan laskennallisilla tarkasteluilla määrittää rakenteen kuivumisen kannalta toimivimmat olosuhteet. Tarkasteluissa voidaan helposti muuttaa ympäristön lämpötilaa, suhteellista kosteutta ja ilman virtausnopeutta sekä ilman vaihtuvuutta tilassa. Myös lattialämmityksen lämpötiloja sekä lämmitysjaksojen pituuksia voidaan varioida, kun haetaan tehokkainta kuivausmenetelmää.

Lattialämmityksen putkijakoa ja valun paksuutta muuttelemalla voidaan selvittää, kuinka suuria lämpötilaeroja valmiin rakenteen pinnassa on odotettavissa rakennuksen käytön aikana ja näin rakennepaksuutta voidaan optimoida eri putkijaoille sopivaksi.

Laskennallisesti voidaan myös selvittää, kuinka korkeaksi suhteellinen kosteus nousee, kun rakenne pinnoitetaan erilaisilla lattianpinnoitteilla. Tässä yhteydessä olisi hyvä myös selvittää, ovatko betonirakenteille määritetyt suhteellisen kosteuden raja-arvot ja arvoastelususyydyt sellaisenaan perusteltuja kipsivalulattialle. Onhan mahdollista, että kipsivalulattian pinnoitushetkellä huokosilman suhteellinen kosteus saisi olla korkeampi kuin betonirakenteella, ilman että kosteusvaurioriskiä muodostuu.

Mahdollista on myös tarkastella, kuinka märeksi lattiarakenne kastuu, jos vesivahingon seurauksena lattialla on kahden vuorokauden ajan 1 cm kerros vettä tai pystyykö paikallavalettu betonirakenne kuivumaan ylöspäin kipsivalun läpi. Käytännössä mitä vain olosuhteita ja tilanteita pystytään mallintamaan laskennallisilla tarkasteluilla, mutta toki tutkimuksella on aina saavutettava taloudellista hyötyä tai teknistä kehitystä. Monimutkaisissa mallinnuksissa laskenta-ajat saattavat venyä jopa viikkojen pituisiksi, joten erilaisen laskentavariaatioiden määrittämiseen kannattaa käyttää aikaa ja harkintaa.

Tähän tutkimukseen liittyen, hyvänä esimerkkinä laskennallisista tarkasteluista voidaan käyttää Leivon ja Rantalan tekemää tutkimusta ”Lattialämmitetyn alapohjarakenteen rakennusfysikaalinen toiminta”. Tässä tutkimuksessa rakenteiden toimintaa on mallinnettu saksalaisella Fraunhofenin yliopistossa kehitetyllä WUFI (*Wärme- und Feuchtetransport instationär*; eng. *Transient Heat and Moisture Transport*) ohjelmistolla. Kuvassa 11.2 on esimerkki lattialämmitetyn betonilaatan laskentatuloksista. (Leivo & Rantala 2004 ja 2005)



Kuva 11.2 Lattialämmitetyn betonilaatan kuivumisen eteneminen laskennallisessa tarkastelussa (Leivo & Rantala 2004 s.6-8).

11.3 Kapasitanssin mittaukseen perustuvan mittalaitteiston kehittäminen

Tutkimuksessa havaittiin, että Knauf LM80 lattiamassan kosteuspitoisuudella ja sähköisillä ominaisuuksilla on selkeä ja toistettavissa oleva yhteys. Tuloksia tulkittaessa huomattiin, että anturityypin muodostamasta epämääräisestä sähkökentästä mitattujen tulosten perusteella ei pystytä määrittämään materiaalin suhteellista permittiivisyyttä. Tästä syystä mittausmenetelmää olisi syytä kehittää, jotta mittaustuloksista saataisiin yleisemmin hyödynnettäviä, eikä pelkästään yhdelle anturityypille soveltuvia.

Mittausmenetelmää voisi kehittää joko enemmän levykondensaattorin suuntaan tai anturityypin voisi muuttaa kokonaan sylinterikondensaattorin kaltaiseksi. Kummassakin kehityssuunnassa elektrodien välille muodostuvaa sähkökenttää olisi pystyttävä rajaamaan luotettavasti.

Käytännön sovellukseksi voisi olla mahdollista kehittää edullinen ja yksinkertainen laitteisto, jonka voisi toimittaa lattiamassan toimituksen yhteydessä. Massan pumppaaja voisi asentaa mittalaitteiston ja kohteen urakoitsija voisi seurata valun kuivumista oma-toimisesti. Valuun jätettynä mittalaitetta voisi hyödyntää tarvittaessa myös rakennuksen käytön aikana.

Hienorakeinen lattiamassa on homogeenisempaa kuin esimerkiksi betoni, joten mahdollista olisi testata myös aiemmin betonissa toimimattomaksi todettujen mittausmenetelmien soveltuvuutta Knauf LM80 lattiamassan kosteuspitoisuuden mittaukseen. Kipsivalurakenteessa ei käytetä raudoitusta, joka usein aiheuttaa häiriötä sähköisten ominaisuuksien mittauksiin. Myös tämä ominaisuus puoltaa sähköisten ominaisuuksien mittaukseen perustuvien menetelmien kehittämistä.

11.4 Lattialämmityksen käytön tehostaminen rakenteen kuivatuksessa

Lattialämmityksellä kelluvan kipsivalulattian kuivumisaikaa pystytään lyhentämään merkittävästi, jos lämpötila pystytään nostamaan huomattavasti normaalia käyttölämpötilaa korkeammaksi. Knauf LM80 lattiamassan korkea vetolujuus ja todella pieni kuivumiskustuma mahdollistavat tehokkaamman lämmityksen käytön, kuin esimerkiksi betonilattojen kuivatuksessa. Kuumennuksen seurauksena rakennekosteus saattaa kuitenkin siirtyä rakenteesta odottamattomiin suuntiin, joten jatkotutkimuksena olisi hyvä selvittää, jääkö askeläänieristeen ja runkobetonin tai rakennuslevyn rajapinta liian kosteaksi kuumentamalla kuivatetun kelluvan pintalaatan alla.

Knauf LM80 lattiamassan lämpölaajenemiskerroin on hieman suurempi kuin betonilla, joten kuumentamalla kuivatettavissa rakenteissa on tarvittaessa huomioitava myös lämpölaajenemisvarat kaikissa rakenteissa ja liitoksissa. Tosin sisätiloissa olevan rakenteen

lämpötilaero kuumentamalla kuivatettuna voi olla enintään noin 35 °C ja asuntokohteissa lattioiden pinta-alat ovat sen verran pieniä, että lämpöliikkeiden suuruudet ovat muutamia millemillejä.

Kipsin hydrataatioreaktion nopeuden perusteella myös kipsimassan lujuudenkehityksen voisi olettaa olevan varsin nopeaa. Näin ollen lämmityksen voisi ehkä aloittaa jo aiemmin kuin 7 vuorokauden kuluttua valusta. Esimerkiksi lämmityksen aloitus 1 vuorokauden kuluttua ja kuumennus 7 vuorokauden kuluttua valusta. Ja jos rakenteen vielä pystyy ohentamaan 40 mm:iin vaikuttaisi mahdolliselta, että kuivumisajoissa olisi mahdollista päästä alle 10 vuorokauteen.

11.5 Kuivumisaika-arvion tarkentaminen

Kipsimassan ominaisuudet huomioiden sen käyttö rajoittuu sisätiloihin ja erityisesti lattiavaluihin. Koska tuotteen käyttökohteiden rakennetyyppivalikoima on näin ollen varsin hyvin rajattu, luotettavan kuivumisaika-arvion pystyisi muodostamaan myös kattavien kenttämittausten perusteella. Jos samojen rakennetyyppien kuivumista pystyisi seuraamaan eri rakennuskohteilla, lopulta olisi mahdollista lisätä esimerkiksi tämänkin tutkimuksen kuvassa 3.13 esitettyjen Knauf lattiaesitteen rakennetyyppien havainnekuvien alle myös rakennetyypin kuivumisaika määritetyissä olosuhteissa.

11.6 Pinnoituksen vaikutusten tutkiminen

Erikoisena ilmiönä Knauf LM80 lattiamassassa havaittiin todella merkittävä nousu huokosilman suhteellisen kosteuden mittaustuloksissa, kun koekappaleet pinnoitettiin muovimatolla. Aiemmissa tutkimuksissa betonirakenteilla ei olla havaittu vastaavia muutoksia, joten kipsimassan kosteuskäyttäytyminen poikkeaa tältä osin huomattavasti betonin kosteusteknisestä käyttäytymisestä.

Jyrkän nousun seuraukset havaittiin selvästi myös rakenteen kosteusjakaumassa. Ennen pinnoitusta kosteusjakauma oli lähes pystysuora, eli valun pohjalla ja arvostelusyvytydellä vallitsi lähes sama huokosilman suhteellinen kosteus. Pinnoituksen jälkeen kosteusjakauma pysyi lähes pystysuorana, mutta mitatut suhteellisen kosteuden arvot olivat jopa kymmeniä prosentteja suurempia kuin juuri ennen pinnoitusta mitatut arvot. Ilmiöön saat-
taa löytyä selitys materiaalin kosteudensiirto-ominaisuuksien selvityksen yhteydessä, mutta myös erillisiä pinnoitukseen liittyviä tutkimuksia tarvitaan. Laskennallisilla tarkasteluilla pystytään arvioimaan kosteusjakauman kehitystä pinnoituksen jälkeen, mutta kuitenkin aina laskennan tulokset on todennettava rakennekokeilla. Pinnoitukseen liittyvissä kokeissa olisi syytä käyttää kuivana asennettavaa pinnoitetta. Tässä tutkimuksessa pinnoitukseen käytettiin märkäliimausmenetelmää, jolloin liimalla voi olla vaikutusta kosteusjakauman kehittymiseen.

12. TUTKIMUKSEN YHTEENVETO

Tutkimuksen tavoitteet

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää Knauf LM80 lattiamassan kuivumisnopeus kelluvissa lattiarakenteissa eli alustastaan irrotetuissa pintavaluissa. Osana tutkimusta selvitettiin lattiavalun paksuuden 50 mm ja 80 mm sekä lämmityksen (25 °C) ja kuumennuksen (50 °C) vaikutus kuivumisnopeuteen. Lisäksi selvitettiin pinnoituksen vaikutus rakenteen kosteusjakaumaan eri kuivatusjärjestelyjen jälkeen.

Tutkimusmenetelmät

Tutkimusmenetelmäksi valittiin kokeellinen seurantatutkimus, jolla pystyttiin selvittämään rakenteiden peruskuivumisnopeus eri kuivatusjärjestelyillä. Tutkimus jaettiin laboriotutkimukseen ja kenttätutkimukseen. Laboriotutkimuksella pystyttiin selvittämään kuivumisnopeuteen vaikuttavien tekijöiden merkitys sekä määrittämään kuivumisnopeus vakio-olosuhteissa ($\theta = 23\text{ °C}$ ja $\phi = 50\text{ % RH}$ sekä $\theta = 20\text{ °C}$ ja $\phi = 50\text{ % RH}$). Kenttätutkimuksilla varmistettiin laboriotutkimustulosten soveltuvuus käytäntöön ja saatiin viitteitä kuivumisolosuhteiden vaikutuksesta kuivumisnopeuteen.

Tärkeimmät tulokset ja niiden merkitys

Tutkimustuloksista havaittiin, että valun paksuudella on merkittävin vaikutus kuivumisaikaan. Lämmittämättömissä rakenteissa laatan paksuntaminen 50 millimetristä 80 millimetriin lähes nelinkertaisti kuivumisaajan. Lämmitetyissä (25 °C) rakenteissa vastaava paksuuden muutos aiheutti kuivumisaajan kolminkertaistumisen ja kuumennetuissa (50 °C) rakenteissa kuivumisaika kaksinkertaistui.

Lämmityksen (25 °C) vaikutus kuivumisnopeuteen oli varsin pieni, mutta kuumennuksen (50 °C) vaikutus oli erittäin merkittävä. Ohuemmissa (50 mm) rakenteissa kuivumisaika ei lämmityksen seurauksena juurikaan muuttunut, mutta kuumennuksen vaikutuksesta kuivumisaika lyheni puoleen verrattuna lämmittämättömään rakenteeseen. Paksummissa (80 mm) rakenteissa lämmityksellä saavutettiin 20 % lyhyempi kuivumisaika ja kuumennuksella kuivumisaika lyheni jopa 80 % lämmittämättömiin rakenteisiin verrattuna.

Knauf LM80 lattiamassaa käytetään lattiarakenteissa vasta, kun alusrakenteen kosteuspiitoisuus on laskenut riittävän alhaiseksi ja rakenne ei ole alttiina säärasituksille. Tässä vaiheessa kuivumisolosuhteita pystytään jo hallitsemaan tilojen lämmityksen ja tuuletuksen avulla, joten niillä ei ole todellisen rakenteen kannalta suurta merkitystä. Hyvät kuivumisolosuhteet saavutetaan, kun huoneilman lämpötila $\theta \geq 20\text{ °C}$ ja suhteellinen kosteus $\phi \leq 50\text{ % RH}$. Tutkimuksen laboriokokeissa olosuhdevaatimus täytettiin täsmällisesti ($\theta = (20 \pm 1)\text{ °C}$ ja $\phi = (50 \pm 5)\text{ % RH}$). Kenttäkohteillakin kuivumisolosuhteet olivat

hyvät, mutta niiden vaihtelu oli suurempaa ($\theta = (9 \dots 25) ^\circ\text{C}$ ja $\phi = (20 \dots 90) \% \text{ RH}$). Vaihteluvälin ääriolosuhteet olivat varsin lyhytkestoisia.

Tutkimustuloksina rakenteiden kuivumisajoiksi on ilmoitettu arvostelusyvyydeltä $0,4 \cdot d$ (d = laatan paksuus) valun pinnasta määritetyt arvot. Kuivumisajat on ilmoitettu valuhetkestä laskettuna siihen saakka, kun arvostelusyvyydellä on saavutettu huokosilman suhteellinen kosteus 85 % RH, 80 % RH ja 75 % RH.

Mittaustulokset oletettiin normaalijakautuneiksi ja niistä laskettiin tulosten analysoinnin yhteydessä otoskeskiarvot ja otoskeskihajonnat. Määritettyjen tunnuslukujen perusteella laskettiin kuivumisajat tavoitekosteuspitoisuuksiin siten, että vain 5% vastaavista rakenteista vaatii ilmoitettua pidemmän kuivumisajan (95 %-fraktiili).

Tutkimuksessa lämmittämättömät 50 mm rakenteet saavuttivat tavoitekosteuspitoisuuden 85 % RH noin 4 viikossa, tavoitekosteuspitoisuuden 80 % RH noin 5 viikossa ja tavoitekosteuspitoisuuden 75 % RH noin 6 viikossa. Paksummissa, 80 mm rakenteissa kuivumisajat olivat huomattavasti pidemmät. Lämmittämättömät rakenteet saavuttivat tavoitekosteuspitoisuuden 85 % RH noin 17 viikossa, tavoitekosteuspitoisuuden 80 % RH noin 20 viikossa ja tavoitekosteuspitoisuuden 75 % RH noin 22 viikossa.

Tärkeäksi tulokseksi nousi myös materiaalin käyttäytyminen pinnoituksen yhteydessä. Tutkimuksessa havaittiin, että materiaalin huokosilman suhteellinen kosteus nousee jopa kymmeniä prosentteja pinnoituksen jälkeen ja pinnoituksen vaikutukset ulottuvat koko materiaalikerrokseen eikä vain sen pintaan.

Tulosten soveltuvuus eri käyttötarkoituksiin ja tulosten käyttöön liittyvät rajoitukset

Tutkimuksessa saavutetut tulokset soveltuvat suoraan käytettäväksi 50 mm ja 80 mm paksuille rakenteille lämmitysjärjestelyt huomioiden. Tuloksista pystytään arvioimaan kuivumisajan suuruusluokkaa rakenteen paksuuden ollessa välillä 50...80 mm ja kuumenuslämpötilan ollessa alle 50 °C. Eri rakenteiden kuivumisaikojen ääriarvot ovat kuitenkin niin kaukana toisistaan, ettei tulosten soveltamiseen pystytä käyttämään lineaarista interpolointia.

Suositukset konkreettisiksi toimenpiteiksi

Materiaalivalmistajan ohjeiden mukaan lattia kuivuu n. 1 cm/vko, kun ympäröivän ilman lämpötila on noin 20 °C ja suhteellinen kosteus 65 % RH. Yli 5 cm paksuille lattiavaluille kuivumisajaksi annetaan 1 cm/1-2 vko samoissa olosuhteissa. Nyt tutkimuksessa ympäristön suhteellinen kosteus oli hieman matalampi, mutta tutkimustulosten perusteella olosuhteiden merkitys kuivumisnopeuteen todettiin varsin pieneksi verrattuna muihin vaikuttaviin tekijöihin.

Lämmittämättömät 50 mm rakenteet saavuttivat arvostelusyvyydellä tavoitekosteuspitoisuuden 85 % RH kuivumisnopeudella 1,17 cm/vko, lämmitetyt (1,25 cm/vko) ja kuumentetut (2,26 cm/vko). Koska lämmittämättömän rakenteen kuivumisnopeus on suurempi kuin valmistajan ilmoittama arvo 1cm/vko, voidaan arvion todeta olevan varsin turvallinen. Kuivumisaika-arvion 50 mm laatalle pystyisi esittämään materiaalin tuotetiedoissa myös seuraavasti:

Kun kuivumisolosuhteet ovat $\theta = (20 \pm 1) ^\circ\text{C}$ ja $\phi = (50 \pm 5) \% \text{RH}$, 50 mm paksun lattiarakenteen kuivumisaika voidaan arvioida seuraavasti:

Ei lattialämmitystä tai lattialämmitys 25 °C	Kuumen nus lattialämmityksellä 50 °C
30 vrk → 85 %RH	16 vrk → 85 %RH
35 vrk → 80 %RH	17 vrk → 80 %RH
40 vrk → 75 %RH	18 vrk → 75 %RH
Kuivumisaika-arvio valupäivästä laskettuna → Huokosilman suhteellinen kosteus arvostelusyvyydellä 0,4*50 mm = 20 mm	
Lämmitys aloitetaan 7 vrk kuluttua valusta. Mahdollinen lämpötilan nosto (50 °C) 10 vrk kuluttu a valusta	
Rakenne on todettava riittävän kuivaksi kosteusmittausten perusteella ennen pinnoitusta	

Lämmittämättömät 80 mm rakenteet saavuttivat arvostelusyvyydellä tavoitekosteuspitoisuuden 85 % RH kuivumisnopeudella 0,47 cm/vko, lämmitetyt (0,60 cm/vko) ja kuumentetut (2,01 cm/vko). Koska lämmittämättömän rakenteen kuivumisnopeus on pienempi kuin valmistajan ilmoittaman arvo 1,0...0,5 cm/vko, todetaan arvion olevan epävarmalla puolella laatan ollessa 80 mm paksu. Arvio on kuitenkin ilmoitettu yli 5 cm laatoille, ilmoittamatta ylärajaa, joten todennäköisesti vielä 70 mm laatalle arvio on turvallinen. Kuivumisaika-arvion 80 mm laatalle pystyisi esittämään tuotetiedoissa myös seuraavasti:

Kun kuivumisolosuhteet ovat $\theta = (20 \pm 1) ^\circ\text{C}$ ja $\phi = (50 \pm 5) \% \text{RH}$, 80 mm paksun lattiarakenteen kuivumisaika voidaan arvioida seuraavasti:

Ei lattialämmitystä	Lattialämmitys 25 °C	Kuumennus lattialämmityksellä 50 °C
120 vrk → 85 %RH	95 vrk → 85 %RH	28 vrk → 85 %RH
135 vrk → 80 %RH	110 vrk → 80 %RH	29 vrk → 80 %RH
155 vrk → 75 %RH	125 vrk → 75 %RH	30 vrk → 75 %RH
Kuivumisaika-arvio valupäivästä laskettuna → Huokosilman suhteellinen kosteus arvostelusyvyydellä 0,4*50 mm = 20 mm		
Lämmitys aloitetaan 7 vrk kuluttua valusta. Mahdollinen lämpötilan nosto (50 °C) 10 vrk kuluttu a valusta		
Rakenne on todettava riittävän kuivaksi kosteusmittausten perusteella ennen pinnoitusta		

Kuivumisaika-arvioiden asettamisessa on huomioitava vielä tutkimuksessa esiinnoussut pinnoituksen merkittävä vaikutus kosteusjakaumaan. Tutkimuksessa esitetyt kuivumisaika-arviot kertovat, kuinka pitkän kuivumisaajan rakenteet tarvitsevat, että asetetuilla arvostelusyvyyksillä 0,4*d saavutetaan asetetut tavoitekosteuspitoisuudet 85 % RH, 80 % RH ja 75 % RH. Kuivumisaika-arviot eivät kuitenkaan vastaa kysymykseen, ovatko arvostelusyvyyydet ja tavoitekosteuspitoisuudet oikein valittuja, joten tuloksista ei saada lopullista vastausta riittävän kuivatuksen määrittelyä varten.

Jatkotutkimus- ja kehitystyötarve

Valun paksuuden vaikutus kuivumisaikaan on merkittävä. Tästä syystä on selvitettävä, kuinka ohuena rakenteen vielä pystyy toteuttamaan siten, että rakenteelle asetetut vaatimukset vielä täyttyvät. Rakenteelle asetettuja vaatimuksia ovat muun muassa rakenteellinen kestävyys (halkeilu ja muodonmuutokset), lämpötilajakauma lattialämmityksessä rakenteessa sekä valun paksuuden vaikutus rakenteen akustisiin ominaisuuksiin.

Kipsin sitoutuminen ja hydrataatio ovat nopeasti eteneviä ilmiöitä, joten tällä perusteella myös Knauf LM80 lattiamassan lujuudenkehityksen voi olettaa olevan nopeaa. Kipsin hydrataatioon tarvittava vesimäärä on varsin pieni verrattuna massan työstettävyyden takia lisättävään vesimäärään. Lisäksi Knauf LM80 lattiamassan vetolujuus on suhteellisen korkea (6 MPa) ja kuivumiskutistuma hyvin pieni (n. 0,1 mm/m) verrattuna betoniin.

Nämä ominaisuudet huomioiden lattialämmityksen käyttöä kuivatukseen olisi mahdollista kehittää nykyisestä ohjeesta ja lattialämmityksen voisi mahdollisesti kytkeä päälle jo valua seuraavana päivänä ilman riskiä rakenteellisista vaurioista. Alkulämmityksen voisi aloittaa 25 °C lämpötilalla, mutta sopiva kuumennuslämpötilan arvo on syytä selvittää tarkemmin jatkotutkimusten perusteella. Liian korkea kuumennuslämpötila saattaa aiheuttaa pintalaatasta poistuvan kosteuden tiivistymistä muihin rakennekerroksiin, joten rakennetta on jatkotutkimuksessa tarkasteltava kokonaisuutena. Kuumennus voi pitkään jatkuessaan aiheuttaa kipsissä dehydratoitumista, joten kuumennuksen vaikutus materiaaliominaisuuksiin olisi myös syytä tutkia.

Pinnoituksen vaikutusta materiaalin ja lattiaarakenteiden kosteuskäyttäytymiseen on tutkittava lisää, jotta saadaan varmuus rakenteen toiminnasta. Jatkotutkimuksissa pinnoitukseen on käytettävät erilaisia pinnoitteita ja ainakin osassa liiman vaikutus on rajattava pois käyttämällä kuivana asennettavia tuotteita. Jatkotutkimuksessa on selvitettävä, mistä pinnoituksen yhteydessä havaittu merkittävä ja välitön huokosilman suhteellisen kosteuden nousu aiheutuu.

Rakenteen kuivumista ja rakennusfysikaalista toimintaa pystytään selvittämään myös tietokonelaskelmilla, mutta luotettavien laskelmien lähtötiedoiksi tarvitaan tarkat materiaaliominaisuudet. Tässä tutkimuksessa valmistettiin koerakenteiden valun yhteydessä materiaali-koekappaleita ja koekappaleaihioita myös materiaaliominaisuuksien määrittämistä varten, joten valmiudet jatkotutkimuksen toteuttamiselle ovat olemassa. Laskennallisilla

tarkasteluilla pystytään selvittämään esimerkiksi valun paksuuden vaikutusta pintalämpötiloihin ja kuivumisaikaan. Laskennallisten tarkastelujen tulokset on aina syytä tarkistaa kokeellisesti, joten laskelmilla koerakenteiden valmistus pystytään kohdentamaan tehokkaasti. Tämän tutkimuksen tuloksina saatiin vertailutulokset (kuivumisnopeuden perusarvot) laskennallisille tarkasteluille.

Työn onnistuminen

Tutkimuksella saavutettiin sille asetetut tavoitteet ja määritettyjen rakenteiden kuivumisajat saatiin selvitettyä riittävällä varmuudella. Koerakenteiden seuranta-aika venyi hie-
man oletettua pidemmäksi, koska tutkimusaikataulun määrittämisessä käytettiin alkupe-
räistä kuivumisaika-arviota, joka tutkimuksessa osoittautui liian pieneksi paksumpien ra-
kenteiden osalta. Aikatauluviivästys ei vaikuttanut kuitenkaan merkittävästi koko tutki-
muksen keston.

LÄHTEET

Andreas, E. L. (2005), Handbook of physical constants and functions for use in atmospheric boundary layer studies, Technical report, U.S. Army Engineer Research and Development Center. Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 54 p.

Björkholtz, D. (1997). Lämpö ja kosteus: rakennusfysiikka, 2. p. ed., Rakennustieto, Helsinki, 150 s.

Björkholtz, D. (1990). Rakennuksen kuivattaminen, Rakentajan kustannus, Helsinki, 76 s.

Chouhan, S.S. (2015). CMOS Integrated Circuits for RF-powered Wireless Temperature Sensor, Doctoral Dissertations, 151 p. + app. 90 p.
Available: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-60-6546-5> [urn].

Chouhan, S.S., Halonen, K. (2015). A Low Power Temperature to Frequency Converter for the On-Chip Temperature Measurement. IEEE Sensors Journal, Vol. 5, No. 8, (2015) pp. 4234-4240

Greenspan, L. (1977). Humidity Fixed Points of Binary Saturated Aqueous Solutions. Journal of Research of the National Bureau of Standards - A. Physics and Chemistry Vol. 81A No.1 (1977), pp.89-96

Hagentoft, C. (2001). Introduction to building physics, Studentlitteratur, Lund, 422 p.

Hall, C. & Hoff, W.D. (2002). Water transport in brick, stone, and concrete, Spon Press, New York, 318 p.

Hautala, M. & Peltonen, H. (1999). Insinöörin (AMK) FYSIIKKA osa 1. 5. painos. Gummerus Kirjapaino Oy, Jyväskylä, 320 s.

van der Heijden, G.H.A., Pel, P., Huinink, H.P. & Kopinga, K. (2011). Moisture transport and dehydration in heated gypsum, an NMR study. Chemical Engineering Science 66 (2011) pp. 4241-4250

Hens, H.S.L.C. (cop. 2007). Building physics - heat, air and moisture: fundamentals and engineering methods with examples and exercises, Ernst & Sohn, Berlin, xiii, 270 p.

Häkkinen, T. & Kanerva, P. (1980). Katsaus kipsin rakennusteknisiin ominaisuuksiin, Helsingin teknillinen korkeakoulu, Otaniemi, 75 s.

Häkkinen, T. & Kanerva, P. (1981). Katsaus kipsin rakennustekniseen käyttöön, Helsingin teknillinen korkeakoulu, Otaniemi, 45 s.

Häkkinen, T. & Kanerva, P. (1984). Kipsin mekaaniset ja kosteustekniset ominaisuudet. Rakenteiden Mekaniikka vol.17 No.3 1984 ss.13-20

- Häkkinen, T. & Kanerva, P. (1983). Kipsin rakennustekniset ominaisuudet ja käyttömahdollisuudet rakennuksissa, Teknillinen korkeakoulu, Otaniemi, 60 s.
- Häkkinen, T., Kanerva, P. & Karstila, K. (1985). Mechanical and physical properties of gypsum and the use of gypsum in the construction industry, TKK, Espoo, 55 p.
- Kaasinen, H., Häkkinen, T. & Kanerva, P. (1983). Tiheyden vaikutus kipsin ominaisuuksiin, Helsingin teknillinen korkeakoulu, Espoo, 77 s.
- Kamakshi, D.A., Shrivastava, A., Calhoun, B.H. (2016) A 0.2 V, 23 nW CMOS Temperature Sensor for Ultra-Low-Power IoT Applications. Journal of Low Power Electronics and Applications, 6, 10 (2016) 16 p.
- Lapin ELY-keskus, (2014) Toimialaraportti 2/2014 Kaivosteollisuus marraskuu 2014 (PDF), Työ- ja elinkeinoministeriö, ISBN Verkkojulkaisu 978-952-227-907-1, 72 s.
- Leivo, V. & Rantala, J. (2005). Lattialämmitetyn alapohjarakenteen rakennusfysikaalinen toiminta, Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere, 140 s.
- Leivo, V. & Rantala, J. (2002). Maanvastaisten alapohjarakenteiden kosteustekninen toimivuus, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Tampere, 107 s.
- Leivo, V. & Rantala, J. (2004). Moisture behaviour of a massive concrete slab with a low temperature floor heating system during the initial drying period. Construction and Building Materials 19 (2005) pp. 297-305
- Mattila, J. (2016). RAK-32700 Elinkaaritekniikka. Luentomoniste 2016 Osa 5. Säilyvyysvaatimukset ja kestävyysuunnittelu. Tampereen teknillinen yliopisto/Rakennustekniikan laitos. 55 s.
- Merikallio, T. (2009). Betonilattian "riittävän" kuivumisen määrittäminen uudisrakentamisessa, Väitöskirja, Verkkokirja (2129 KB), 136 s.
Saataavilla: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-22-9957-7> [urn].
- Merikallio, T., Niemi, S. & Komonen, J. (cop. 2007). Betonilattiarakenteiden kosteudenhallinta ja päällystäminen, Suomen betonitieto, Helsinki, 97 s.
- Merikallio, T. (2015). Betonirakenteiden kosteusmittaus ja kuivumisen arviointi, Rakennustieto, Helsinki, 58 s.
- Merikallio, T., Niemi, S. & Komonen, J. (2007). Betonirakenteiden päällystämisen ohjeet, Suomen betonitieto: Lattian- ja seinänpäällysteliitto, Helsinki, 47 s.
- Mäkelä, M. & Mäkelä, M. (2005). Tekniikan kaavasto: matematiikan, fysiikan, kemian ja lujuusopin peruskaavoja sekä SI-järjestelmä, 5.uudistettu painos, Amk-kustannus: Tammertekniikka, Tampere, 205 s.
- Nevander, L.E. & Elmarsson, B. (2006). Fukthandbok : praktik och teori, 3. utgåvan, 6. tryckningen Svensk byggtjänst, Solna, 538 s.

Paukku, E. (1999). Lattiapäällysteiden kosteusominaisuuksia: diplomityö, 121+26 s. Saatavilla: <https://tut.finna.fi/Record/tutcat.135485>

Radu A, Barreira E, Saber H, Hens H, Vinha J, Vasilache M et al. (2012). Heat, Air and Moisture Transfer Terminology, Parameters and Concepts. CIB, International Council for Research and Innovation in Building and Construction; FEUP, Porto University, Faculty of Engineering; LFC, Building Physics Laboratory, 2012. 44 p.

Rakennustietosäätiö RT (2010). RT 14-10984 Betonin suhteellisen kosteuden mitausohjeet helmikuu 2010, 16 s.

Rakennustietosäätiö RT (2013). SisäRYL 2013, RT 14-11103 Rakennustöiden yleiset laatuvaatimukset, Talonrakennuksen sisätyöt. 352 s.

Ramboll Finland Oy. (2012). Tuhkarakentamisen käsikirja, Energiantuotannon tuhkat väylä-, kenttä- ja maarakentamisessa. Verkkojulkaisu, pdf 13.1.2012. 65 s.

Roels, S., Camerliet, J., Hens, H., Adan, O., Brocken, H., Cerny, R., Pavlik, Z., Ellis, A.T., Hall, C., Kumaran, K., Pel, P., Plagge, R. (2004). A Comparison of Different Techniques to Quantify Moisture Content Profiles in Porous Materials. Journal of Thermal Envelope and Building Science, Vol. 27(2004), No. 4, pp. 261-276

Rämö, S. (2010). Ydinvoimalaitosten merivesirakenteiden säilyvyysuunnittelu. Insinööriyö, Verkkokirja (2502 KB), 68 s. Saatavilla: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201005108517>

Sarvaranta, L. & Kaasinen, H. (1994). Recent trends in gypsum research, Technical Research Centre of Finland, Building Technology, Concrete and Minerals Technology, Espoo, 27 p.

Siikanen, U. (2009). Rakennusaineoppi, 7. painos, Rakennustieto Oy, Helsinki, 328 s.

Siikanen, U. (2014). Rakennusfysiikka: perusteet ja sovelluksia, Rakennustieto, Helsinki, 256 s.

Seck, M.D., Van Landeghem, M., Faure, P., Rodts, S., Combes, R., Cavalié, P., Keita, E. & Coussot, P. (2015). The mechanisms of plaster drying. Journal of Materials Science, vol. 50, issue 6, pp. 2491-2501

Seppänen, R., Tiihonen, S., Wuolijoki, H., Kervinen, M., Smolander, J., Haavisto, A., Karkela, L. & Varho, K. (1999). MAOL-taulukot, 1.-2. uudistettu painos, Otava, Helsingissä, 159 s.

SFS-EN ISO 12572 (2016) Hygrothermal performance of building materials and products. Determination of water vapour transmission properties. Cup method. 34 p.

SFS-EN ISO 13788 (2012) Hygrothermal performance of building components and building elements. Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation. Calculation methods. 54 p.

Suomen betoniyhdistys (2014). Betonilattiat 2014, by45, bly7, BY-Koulutus, Helsinki, 183 s.

Suomen rakennusinsinöörien liitto (2011). RIL 250-2011 Kosteudenhallinta ja homevaurioiden estäminen, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto, Helsinki, 243 s.

Suomen rakentamismääräyskokoelma (RakMk) osa C2 (1998) Kosteus, Määräykset ja ohjeet. 16 s.

Taivainen, H., Häkkinen, T. & Kanerva, P. (1982). Kuituvahvistuksen vaikutus kovettuneen kipsin mekaanisiin ominaisuuksiin, Helsingin teknillinen korkeakoulu, Espoo, 41 s.

Świrski-Perkowska, J. (2010). Estimation of moisture superficial diffusivity in porous materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 54 (2011) pp. 692-697

Terheiden, K. (2008). Simultaneous measurement of vapor and liquid moisture transport in porous building materials. *Building and Environment* 43 (2008) pp. 2188-2192

Vinha, J. (2014). RIL 255-1-2014 Rakennusfysiikka 1, Rakennusfysikaalinen suunnittelu ja tutkimukset, Suomen Rakennusinsinöörien liitto, Helsinki, 500 s.

Vinha, J. (2011a). RAK-33500 Rakennusfysiikka. Luentomoniste 2011 Osa 1. Tampereen teknillinen yliopisto/Rakennustekniikan laitos. 520 s.

Vinha, J. (2011b). RAK-33500 Rakennusfysiikka. Luentomoniste 2011 Osa 2. Tampereen teknillinen yliopisto/Rakennustekniikan laitos. 246 s.

Vinha, J., Valovirta, I., Korpi, M., Mikkilä, A. & Käkelä, P. (2005). Rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet lämpötilan ja suhteellisen kosteuden funktiona, Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere, 101 s.

Voss, A., Pour-Ghaz, M., Vauhkonen, M., Seppänen, A. (2016). Electrical Capacitance Tomography to monitor unsaturated moisture ingress in cement-based materials. *Cement and Concrete research*, 89 (2016) pp. 158-167

Yang, L., Zhang, Y. & Yan, Y. (2015). Utilization of original phosphogypsum as raw material for the preparation of self-leveling mortar. *Journal of Cleaner Production* 127 (2016) pp. 204-213

Materiaalivalmistajan ja mittalaitevalmistajien ohjeet

Agilent (2008), U1701A Dual Display Handheld Capacitance Meter, 14 p.

Knauf esitteet ja ohjeet ladattu materiaalivalmistajan verkkosivuilta 02.02.2017

Knauf, Kipsilaastien ja lattiamassan vedenkesto, Kankaanpää 14.12.2010, 1 s.

Knauf, Lattiaesite 2016, 4 s.

Knauf, Knauf lattiamassojen LM80 ja LM35 kuivuminen ja päällystäminen, 2 s.

Knauf (2016), Käyttöturvallisuustiedote (KTT) Knauf LM35, Knauf LM60 ja Knauf LM80 Tasoitemassat, 28.10.2016, 6 s.

Knauf, M1-luokitus kipsilattiamassa LM80, 1 s.

Knauf (2016), Tuotekortti (tko) Knauf LM80 Lattiamassa 2/2016, Korttinro 11, 2 s.

Knauf, Työohje Knauf LM80 Kipsilattiamassa, 1 s.

Knauf (2014), Englanninkielinen tuotekortti, Knauf Fließestrich FE80 Allegro floor screed, 5/2014, 4 p.

Rotronic (2016), HC2-S brochure 4 p.

Rotronic (2015), IN-1 2 brochure 2 p.

Rotronic (2015), Accessories and Parts for probes, indicators and transmitters, 29 p.

Rotronic (2016), HygroClip 2 (HC2) Humidity Temperature Probes: User Guide 50 p.

Rotronic (2016), HygroLog HL-NT data logger: Instruction manual, 75 p.

Vaisala (2006), Vaisala HUMICAP rakenteiden kosteusmittauslaite HM44, U254FI-1.3, 62 s.

Vaisala (2006), Vaisala kosteuskalibraattori HMK15, M210185FI-C, 40 s.

Wiiste (2016), SolidRH käyttöohje, 24 s.

Wiiste (2016), RT 38796 SolidRH -kosteudenhallintajärjestelmä, 2 s.

Wiiste (2015), SolidRH SH1 tuotekortti, 2 s.

Wiiste (2015), SolidRH - Anturin asennus, 1 s.

LIITTEET

LIITE 1: Laboratoriokokeiden tutkimustulokset 67 s.

LIITE 2: Kenttäkohteen 1 tutkimustulokset 6 s.

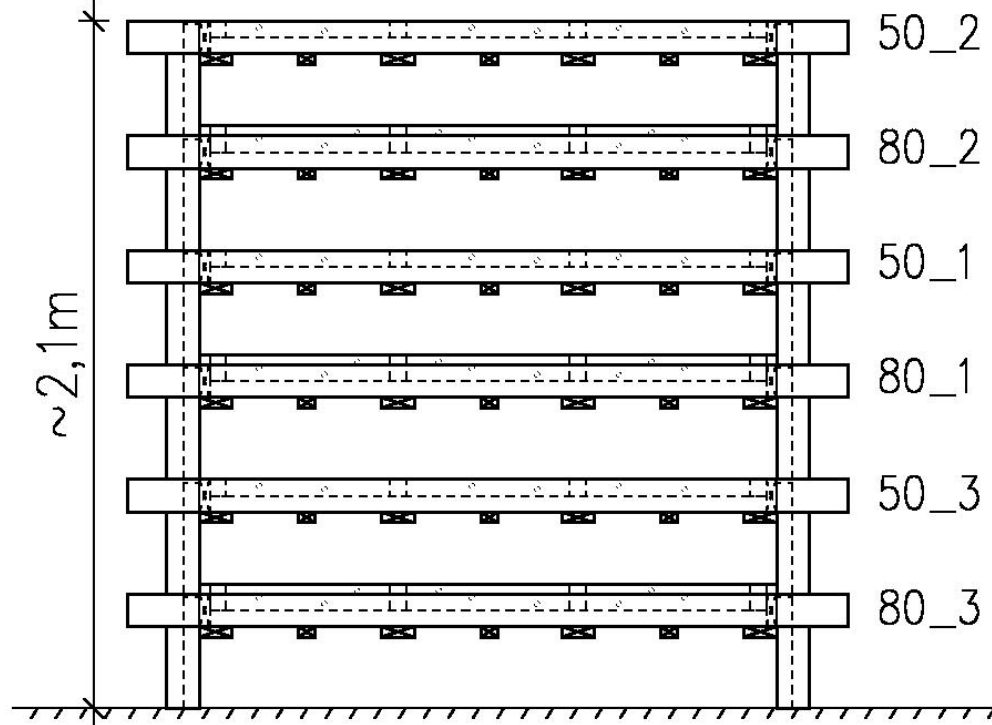
LIITE 3: Kenttäkohteen 2 tutkimustulokset 11 s.

LIITE 4: Kapasitanssimittausten tulokset 3 s.

LABORATORIOKOKEIDEN TUTKIMUSTULOKSET

SUUNNITELMA

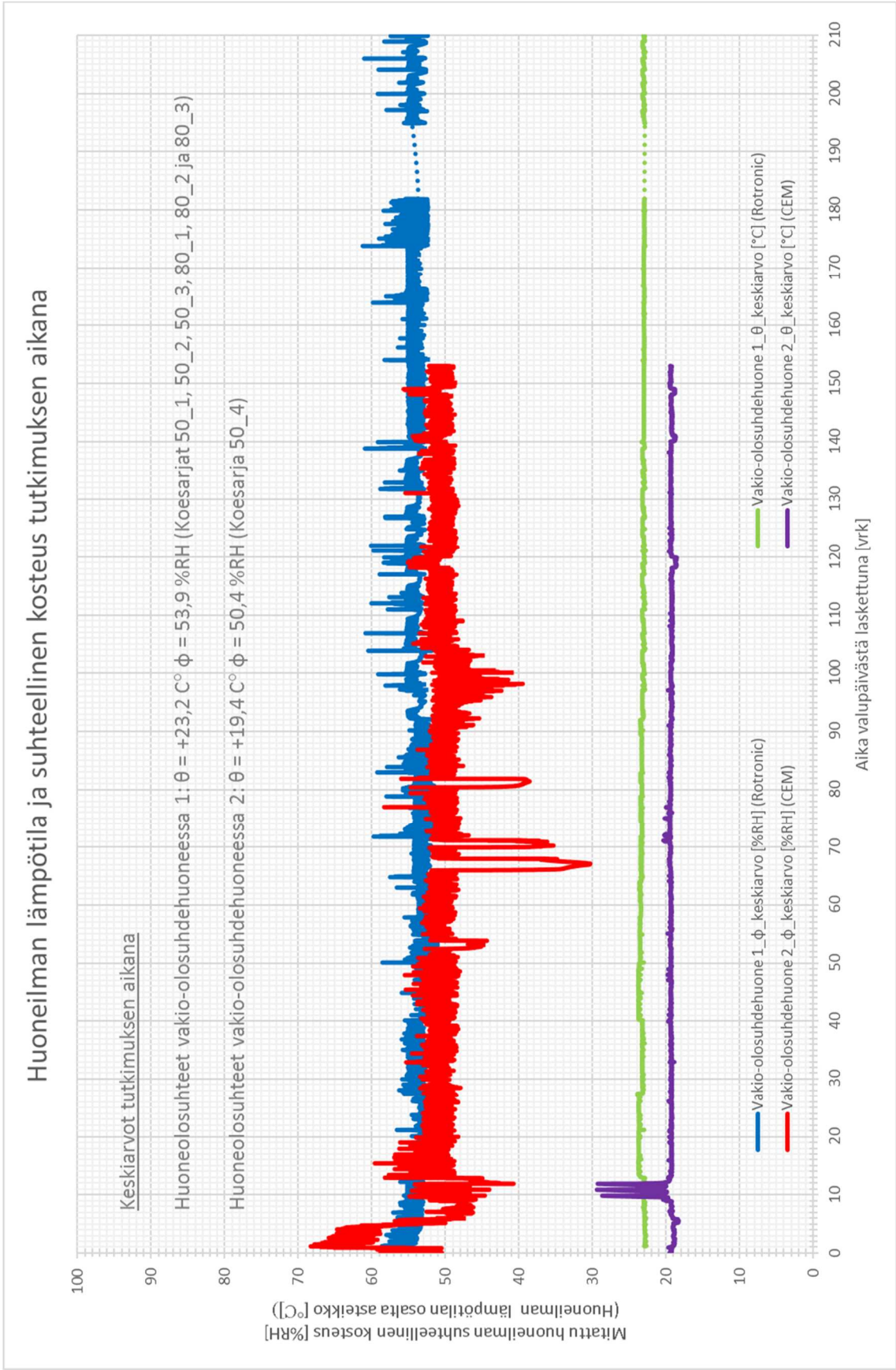
Koesarjat koottuna vakio-olosuhdehuoneen seinustalle



TOTEUTUS



HUONEOLOSUHTEET LABORATORIO



KOESARJA 50_1

Suunnitelma

Valun paksuus: 50 mm

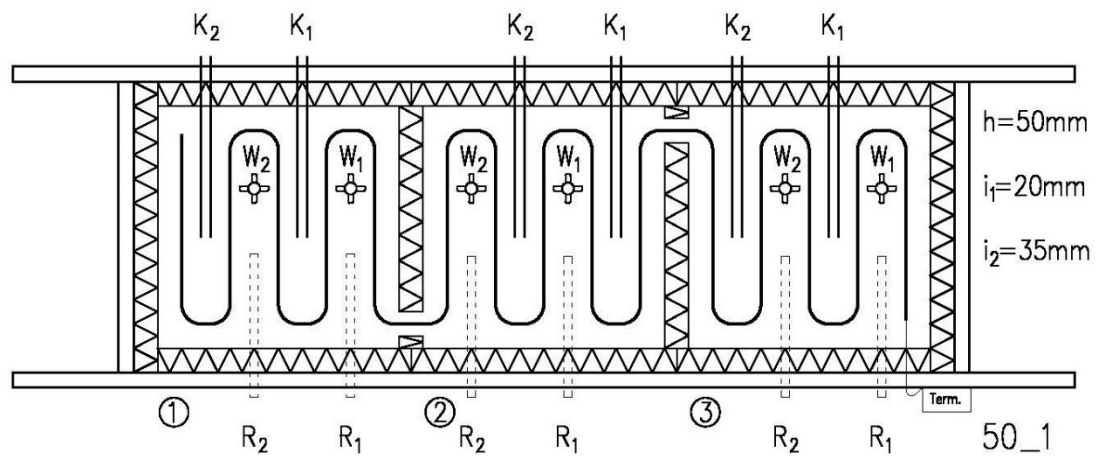
Lämmitys: 7 vrk ilman lämmitystä, sen jälkeen 25 °C jatkuva

Rotronic HC2-S antureita: 6 kpl

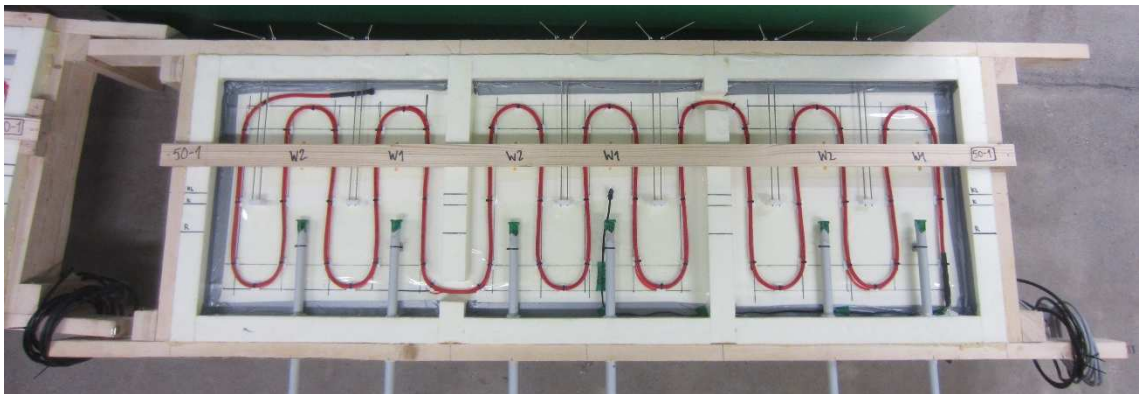
Wiisteen SolidRH SH1 antureita: 6kpl

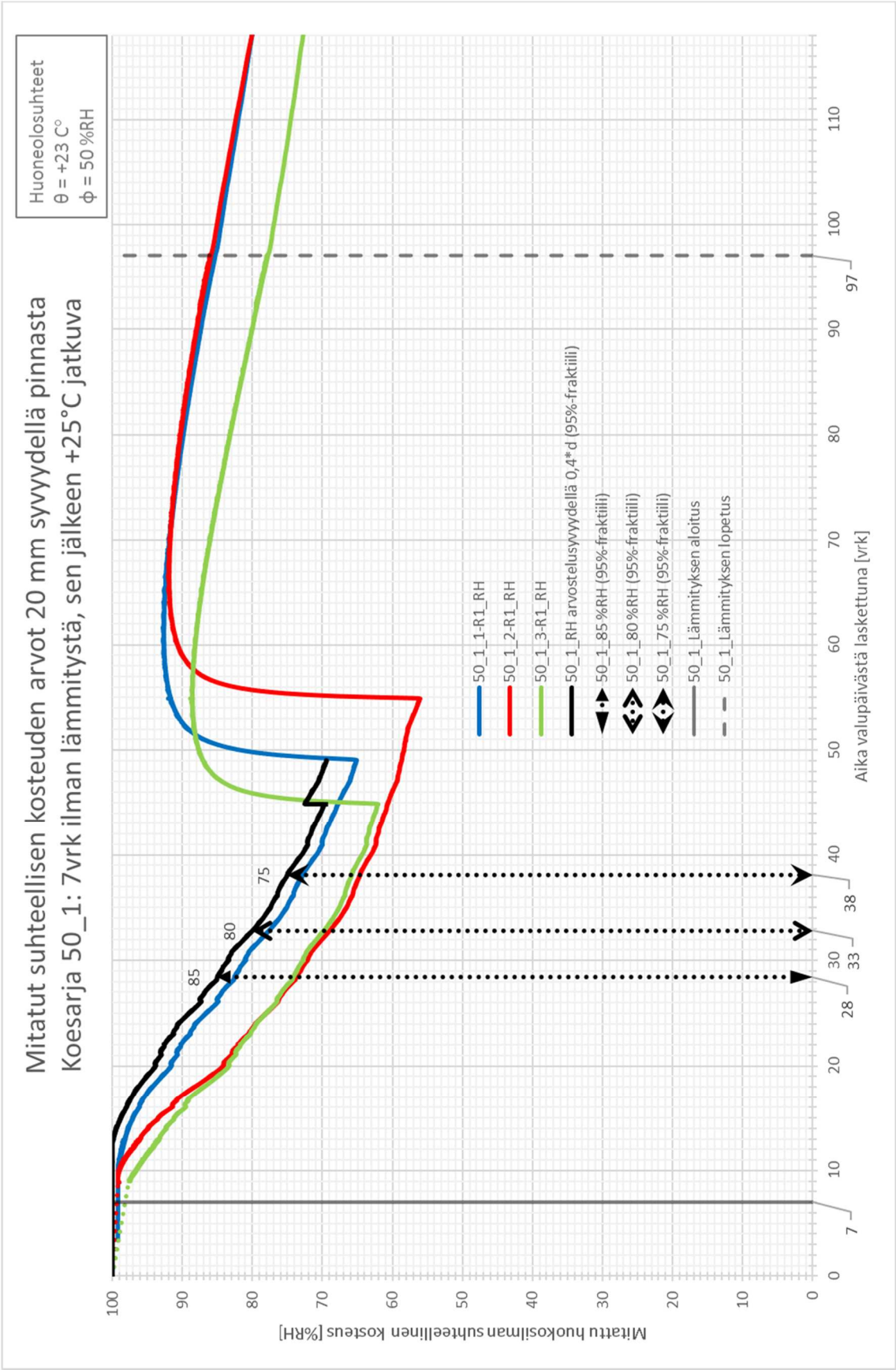
Kapasitanssineulapareja: 6 kpl

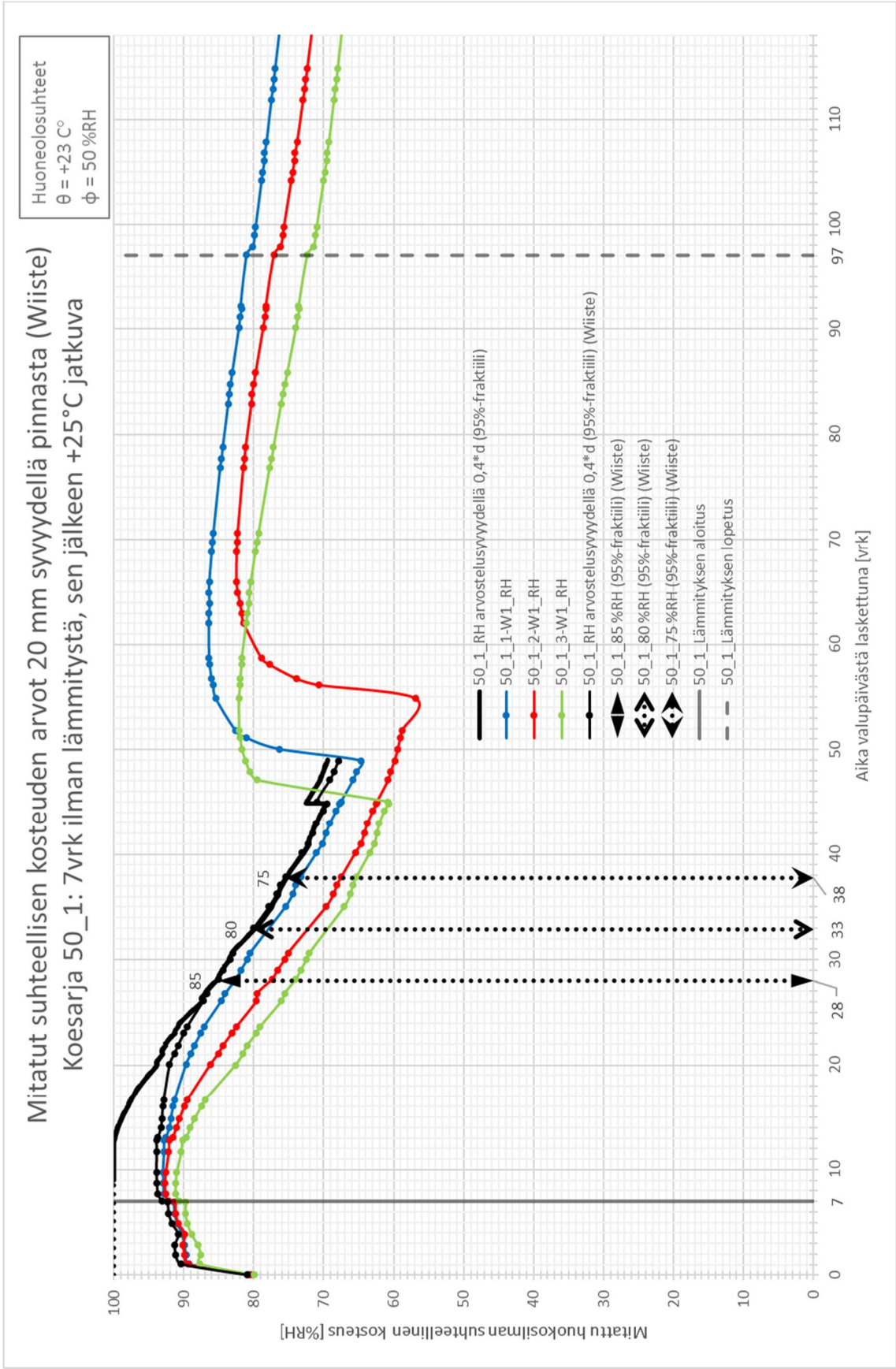
Poikkeamat suunnitelmasta: Ei poikkeamia

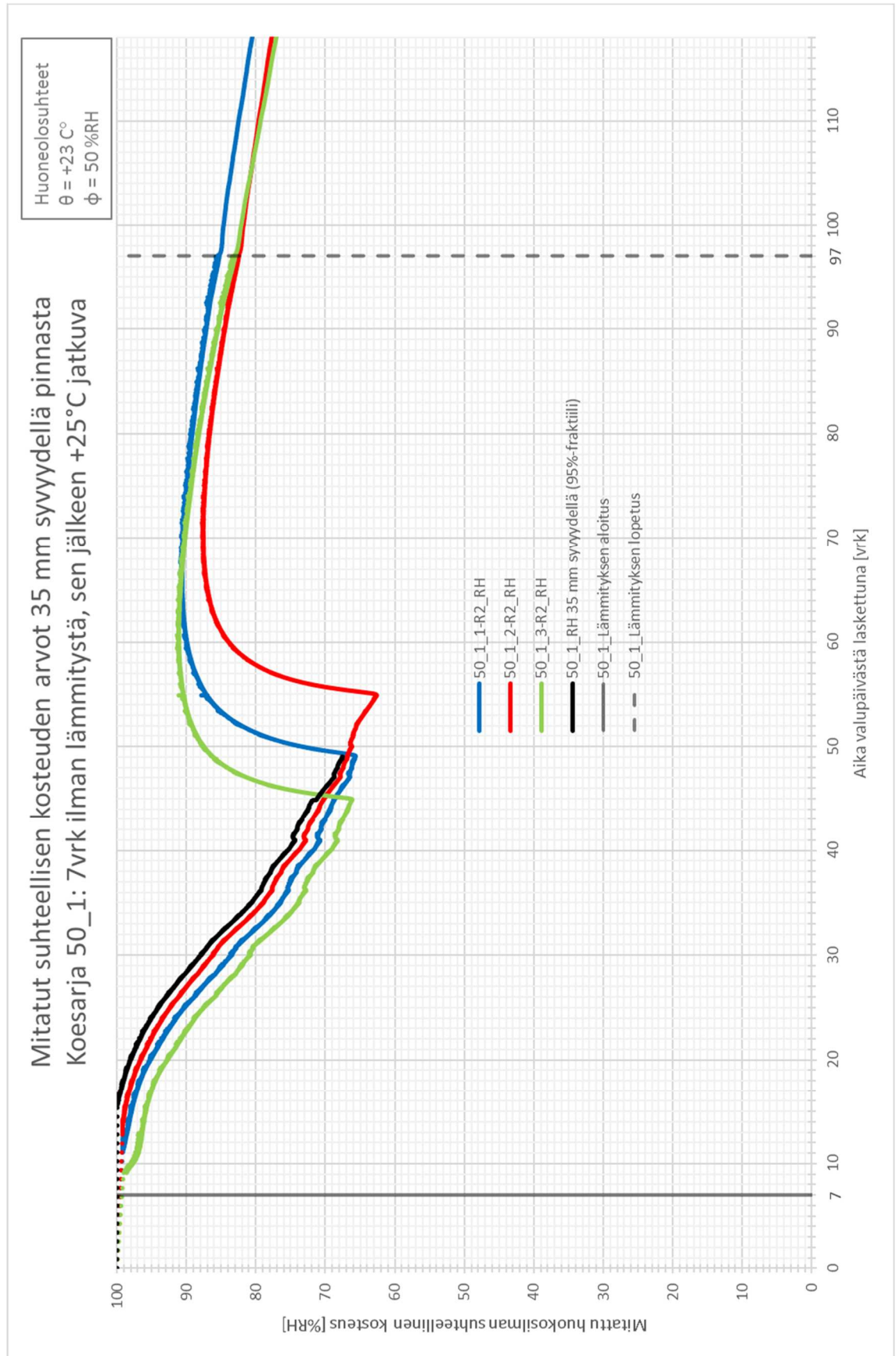


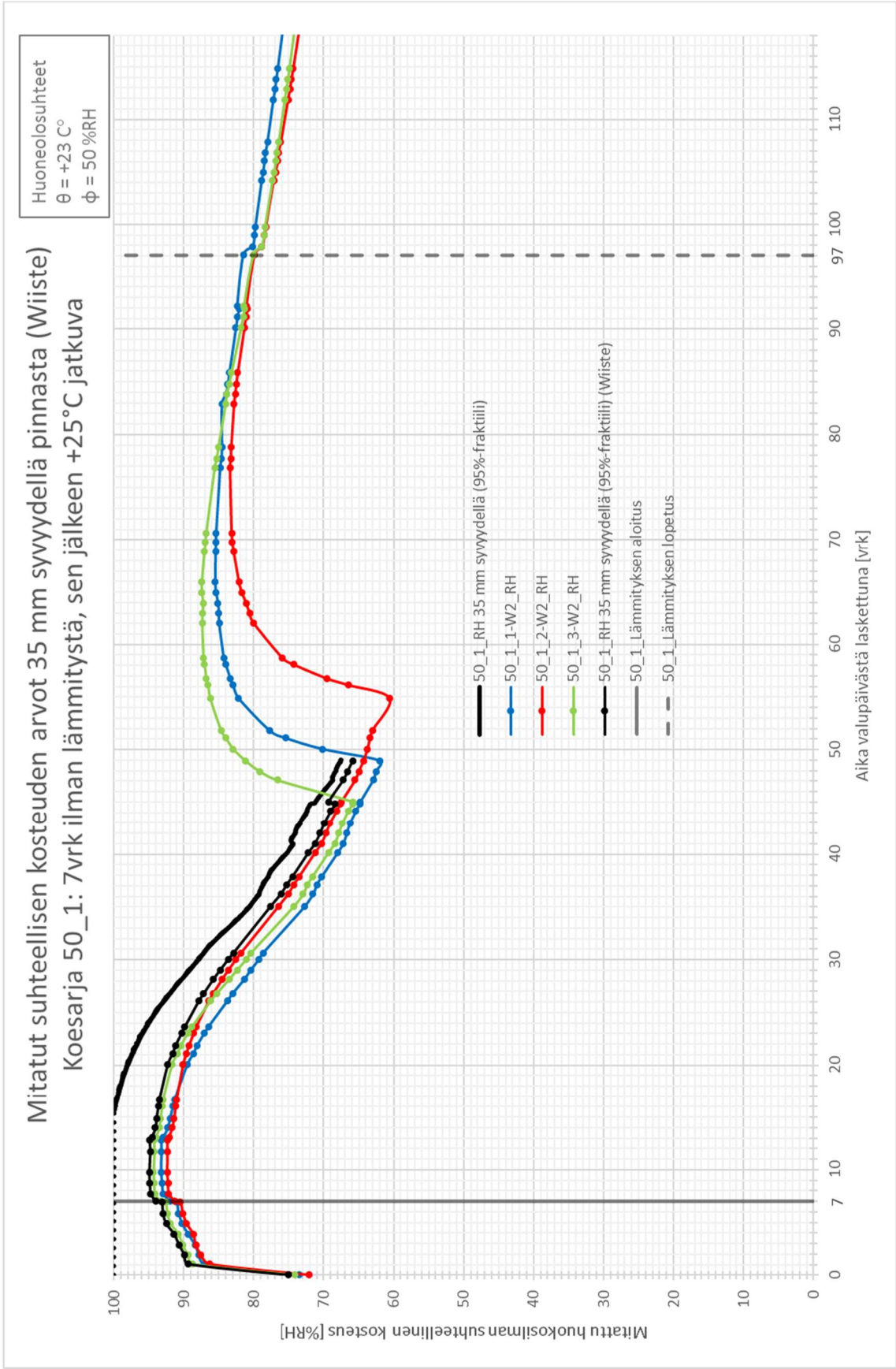
Toteutus

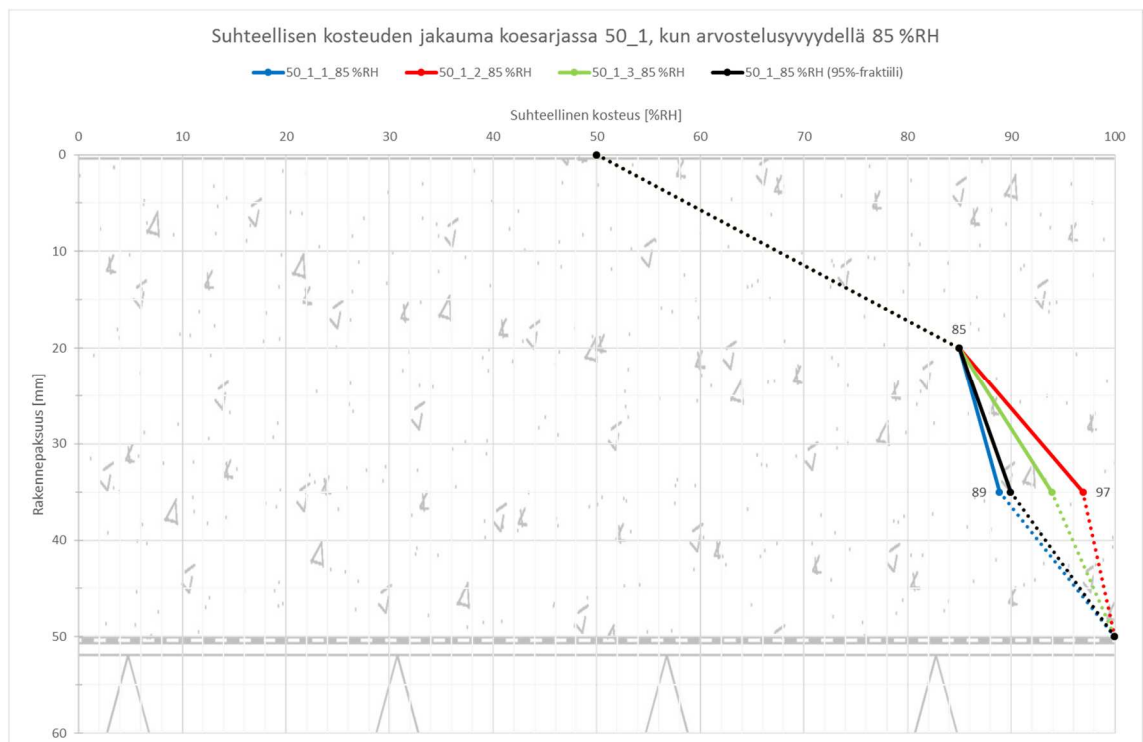
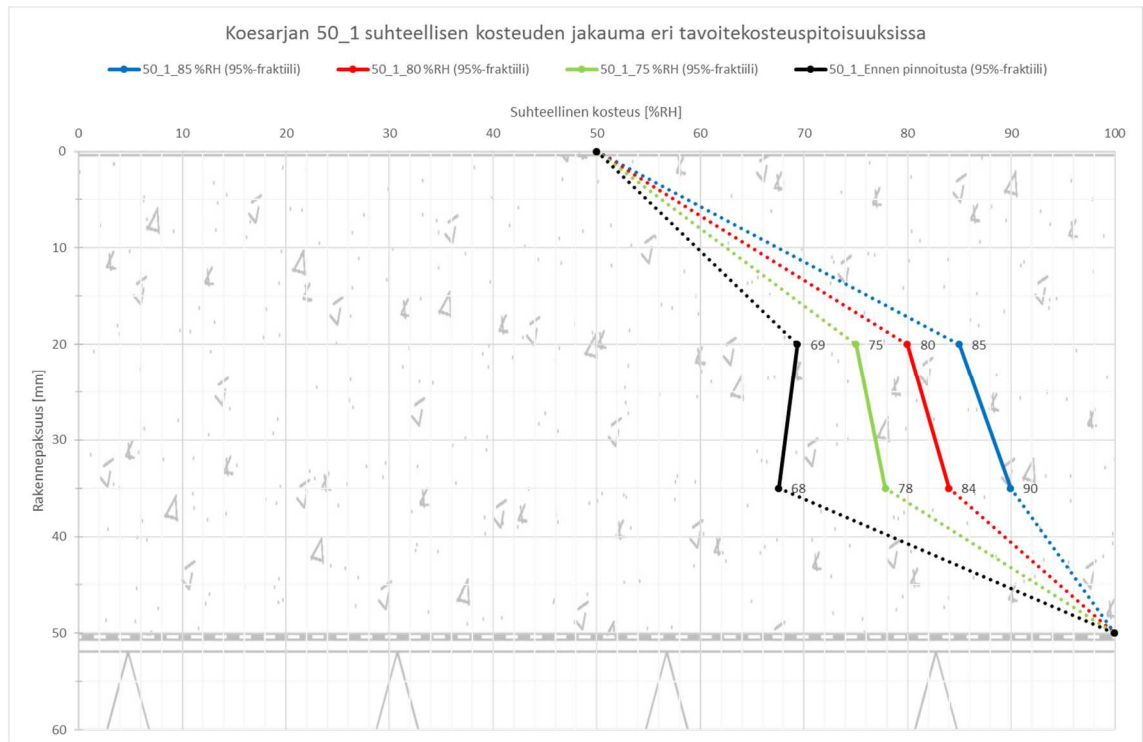


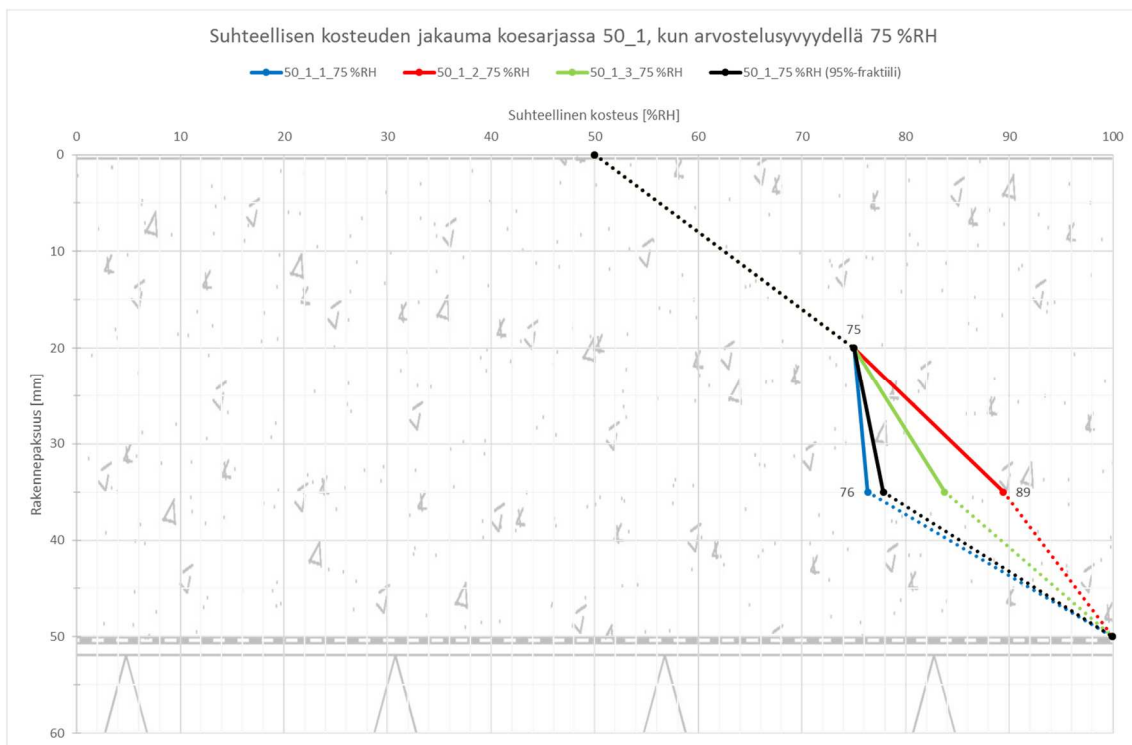
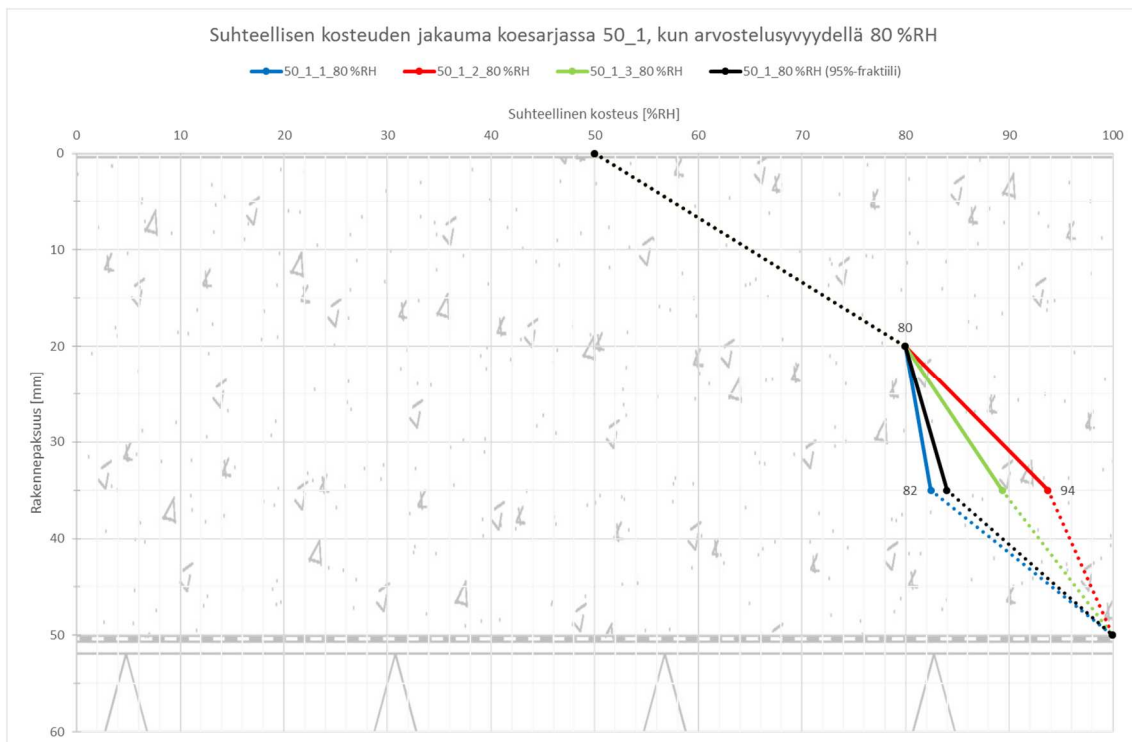


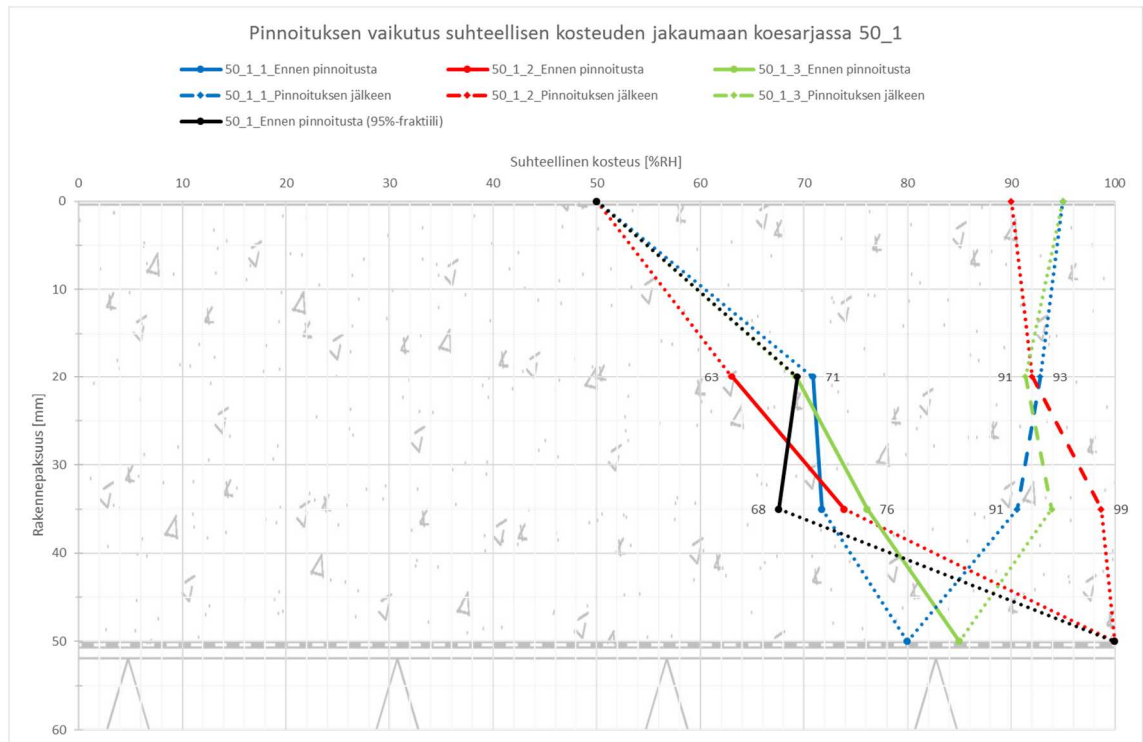












KOESARJA 50_2

Suunnitelma

Valun paksuus: 50 mm

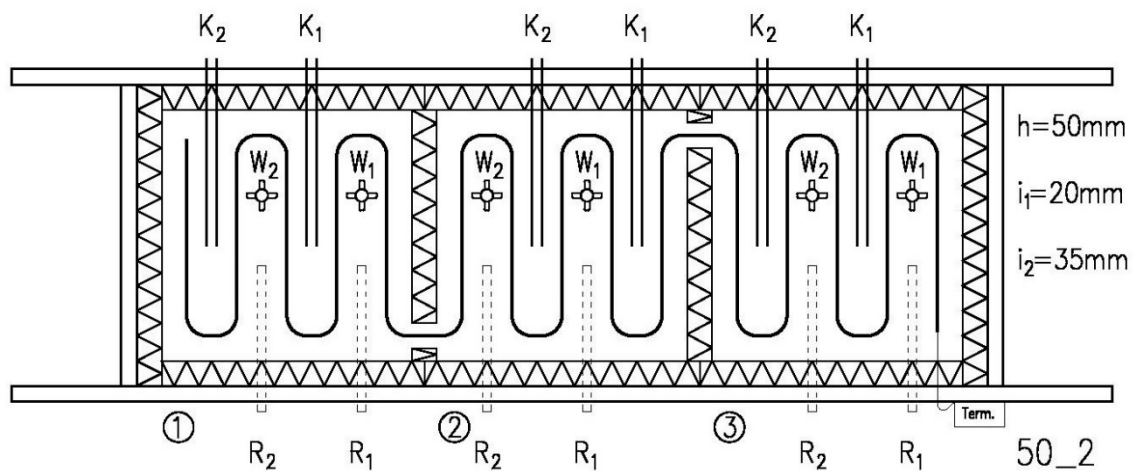
Lämmitys: 7 vrk ilman lämmitystä, sen jälkeen 3 vrk 25 °C, loppuaika 50 °C jatkuva

Rotronic HC2-S antureita: 6 kpl

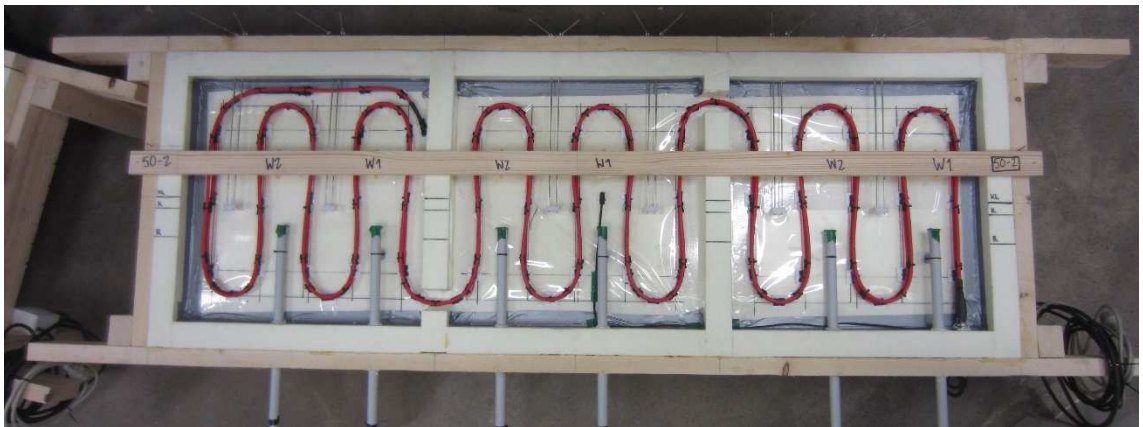
Wiisteen SolidRH SH1 antureita: 6kpl

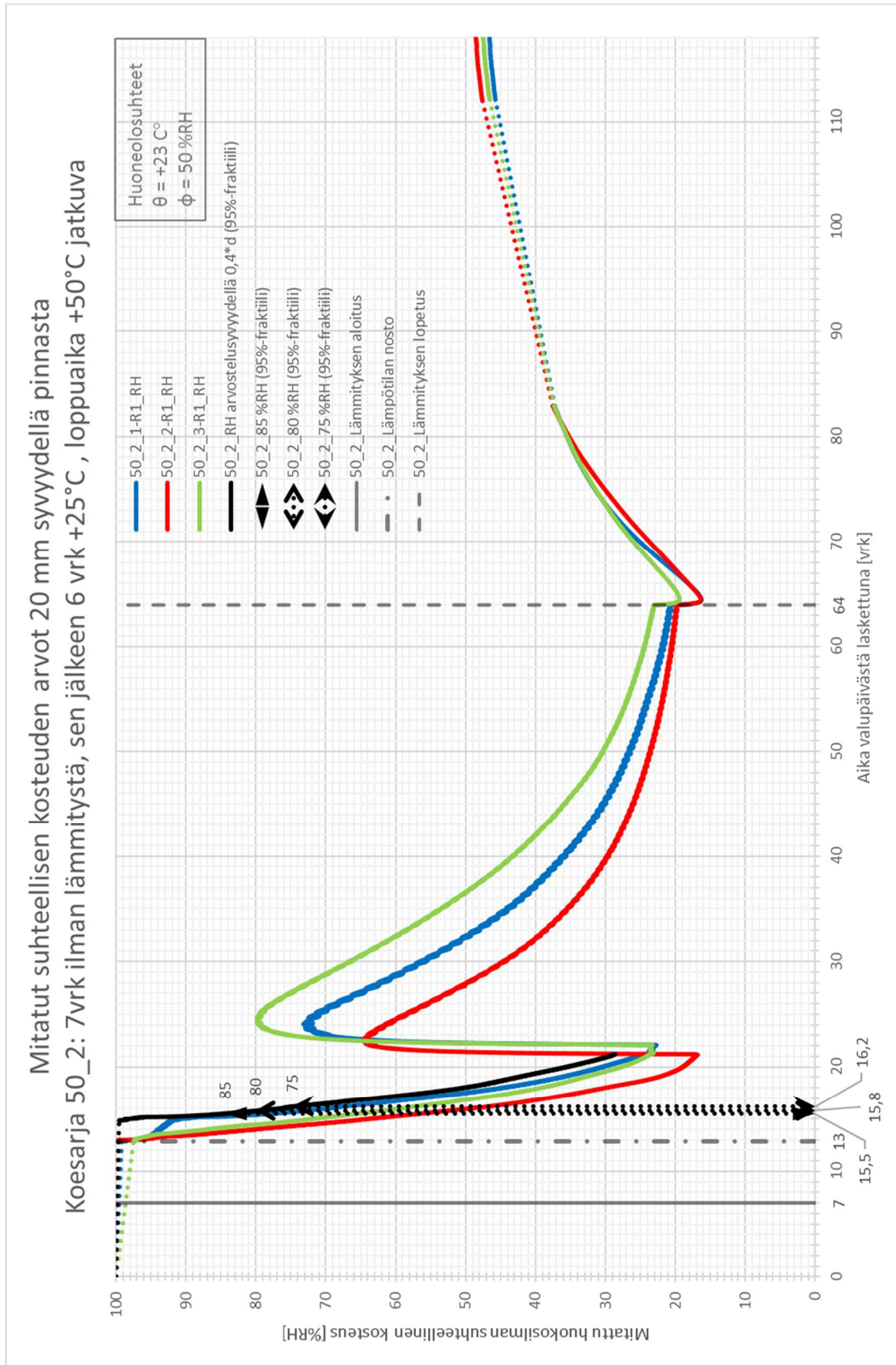
Kapasitanssineulapareja: 6 kpl

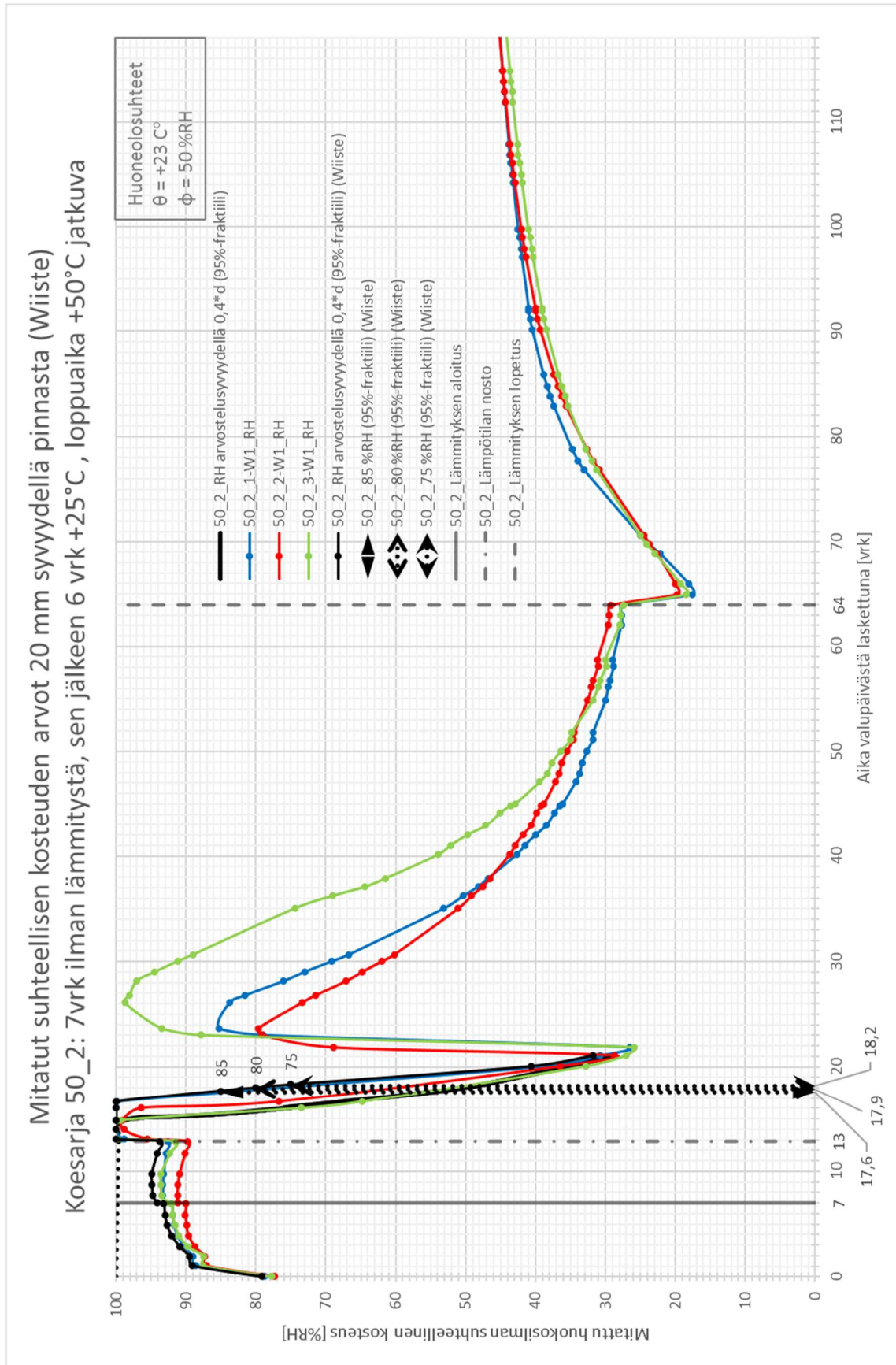
Poikkeamat suunnitelmasta: 7 vrk ilman lämmitystä, sen jälkeen **6 vrk** 25 °C, loppuaika 50 °C jatkuva

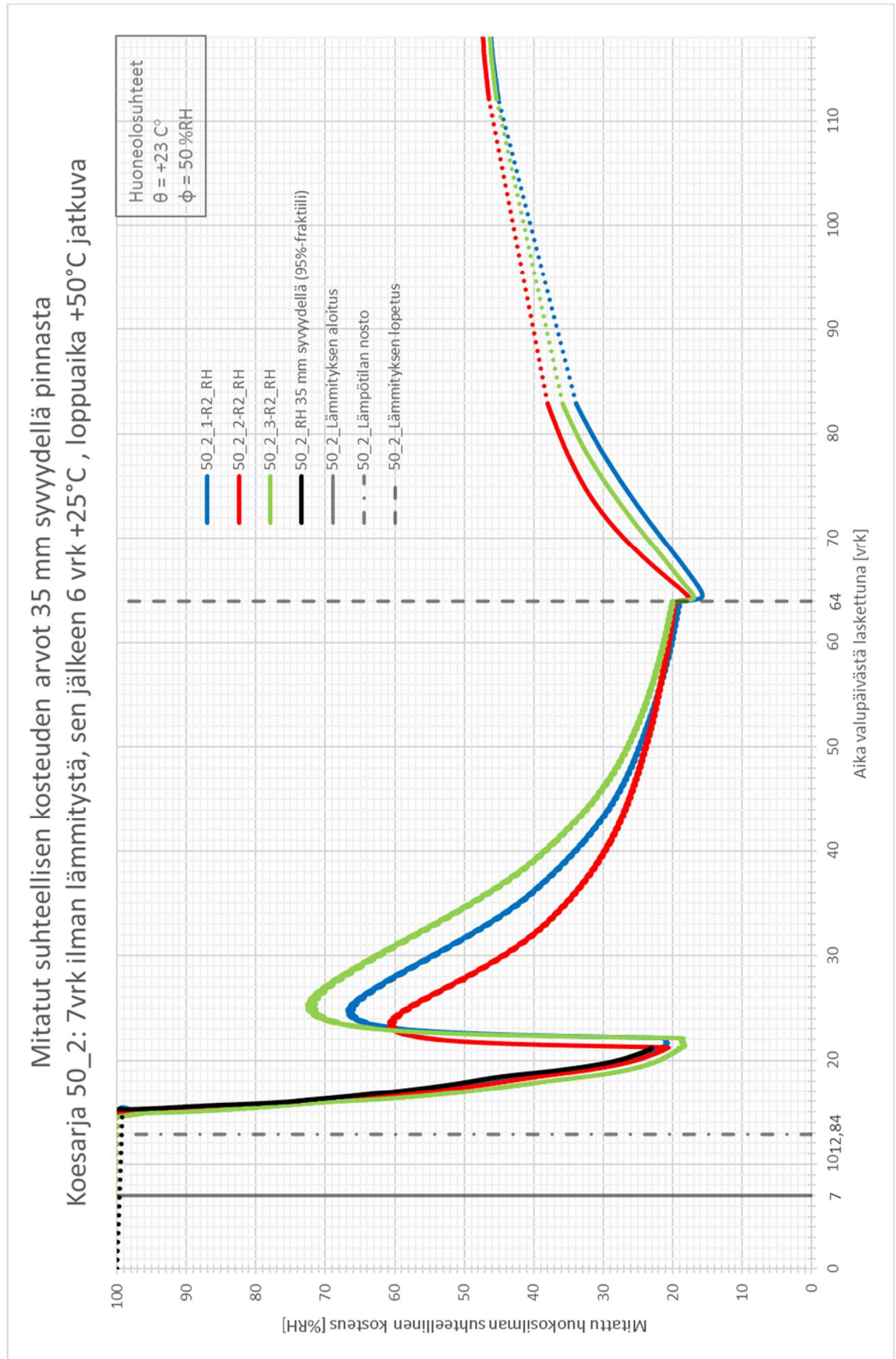


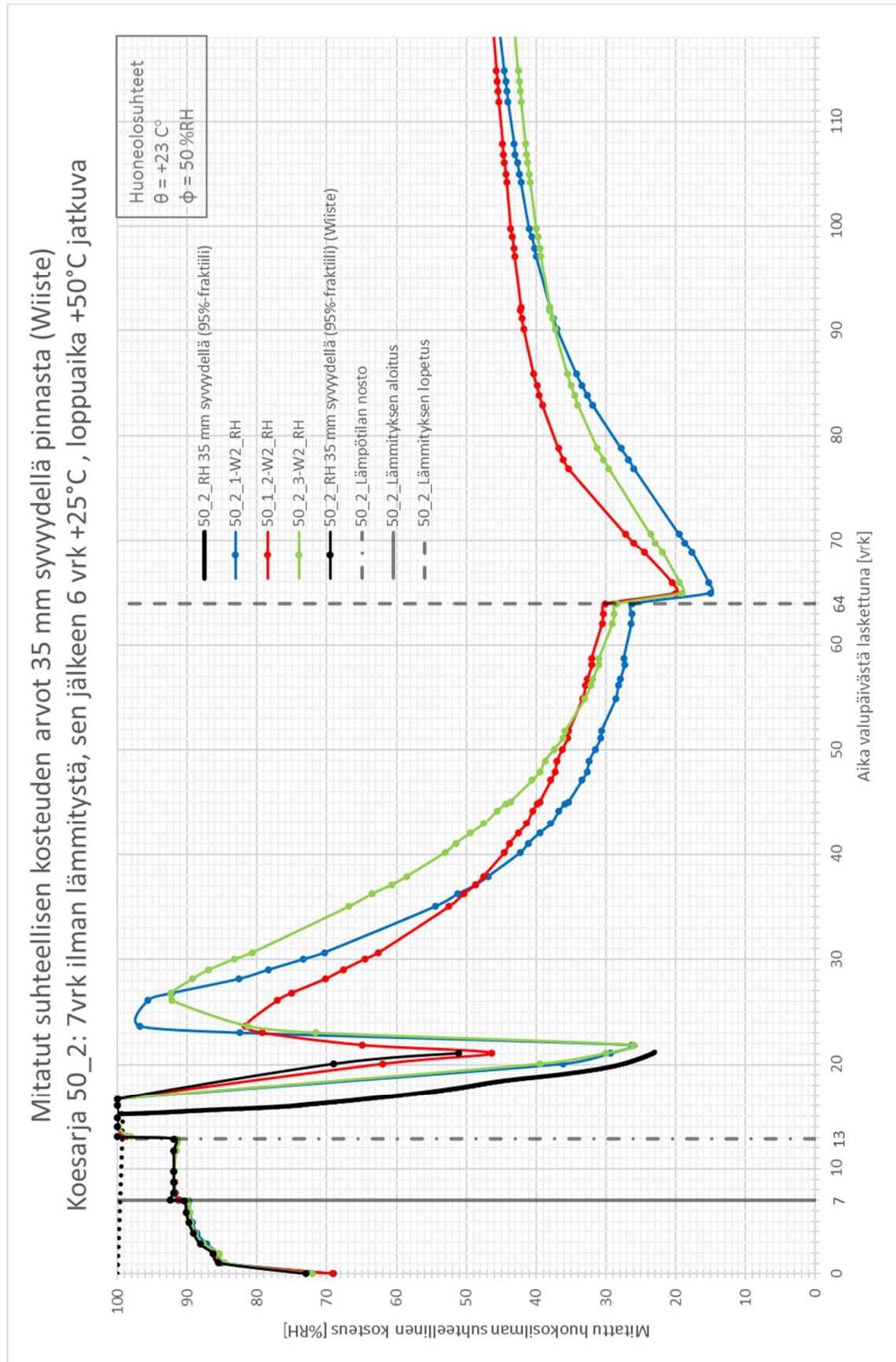
Toteutus

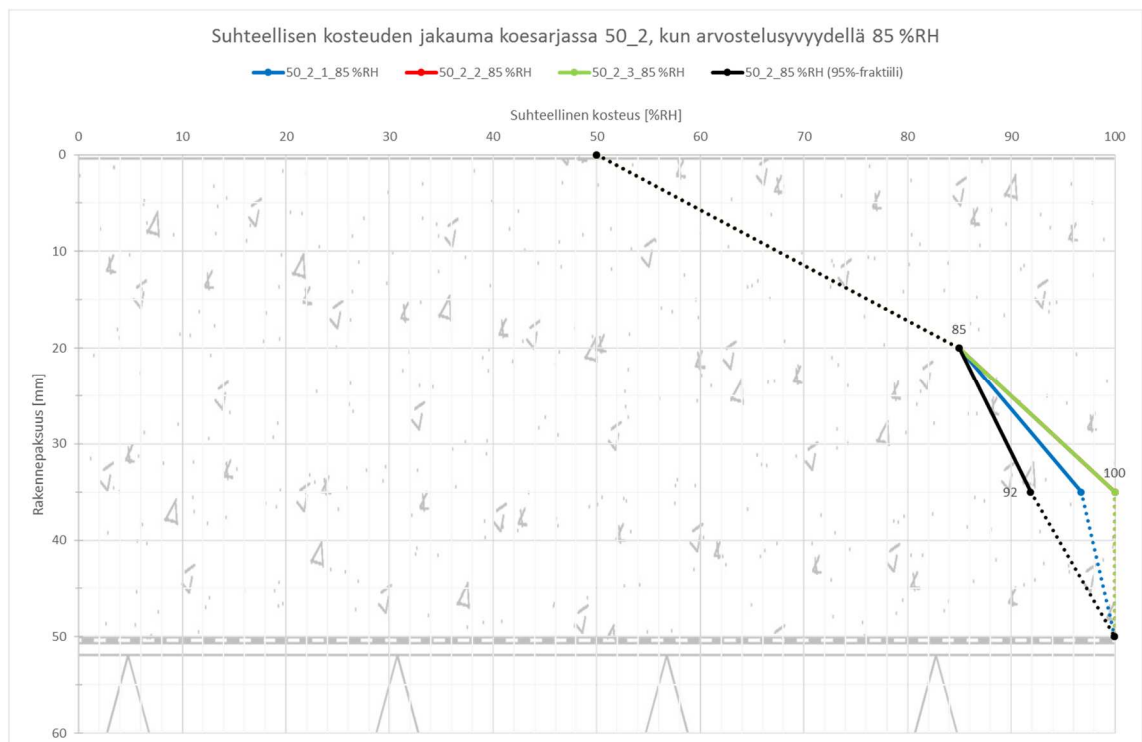
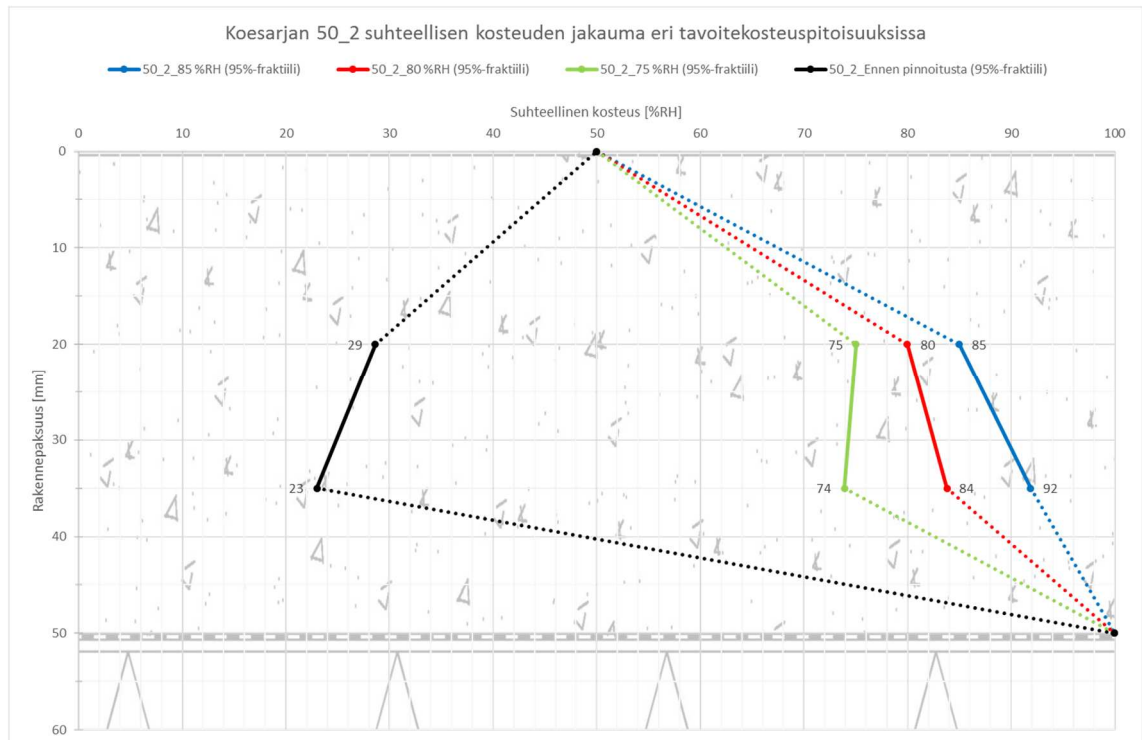


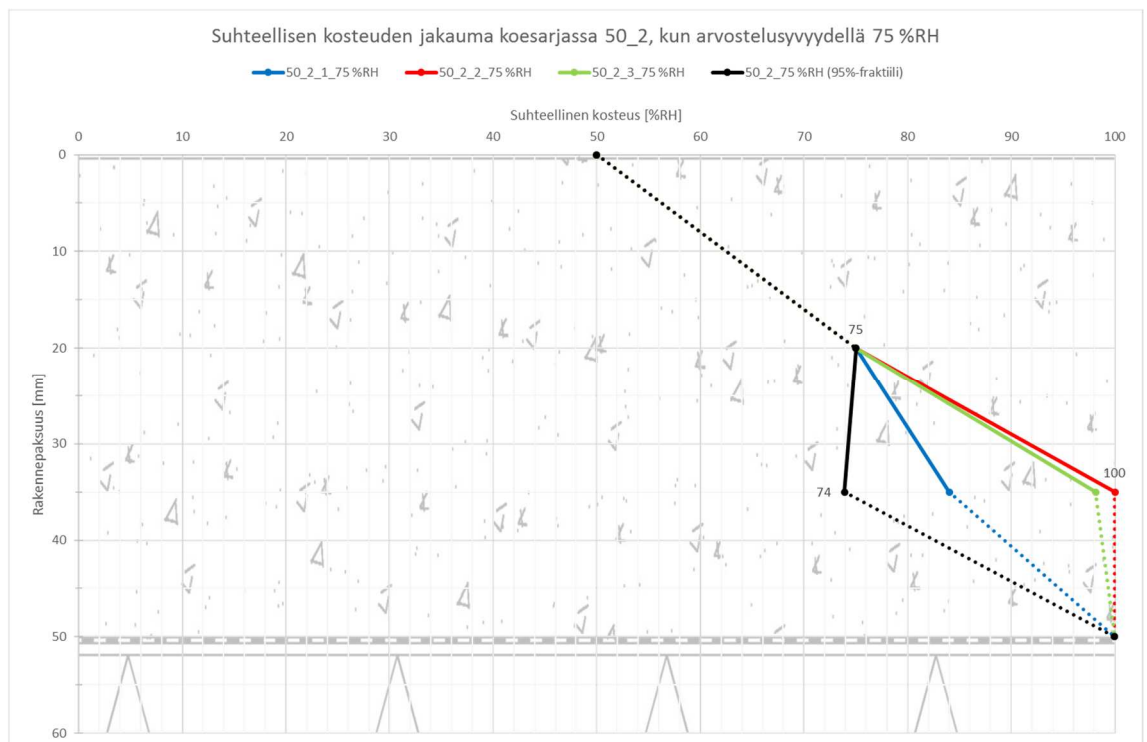
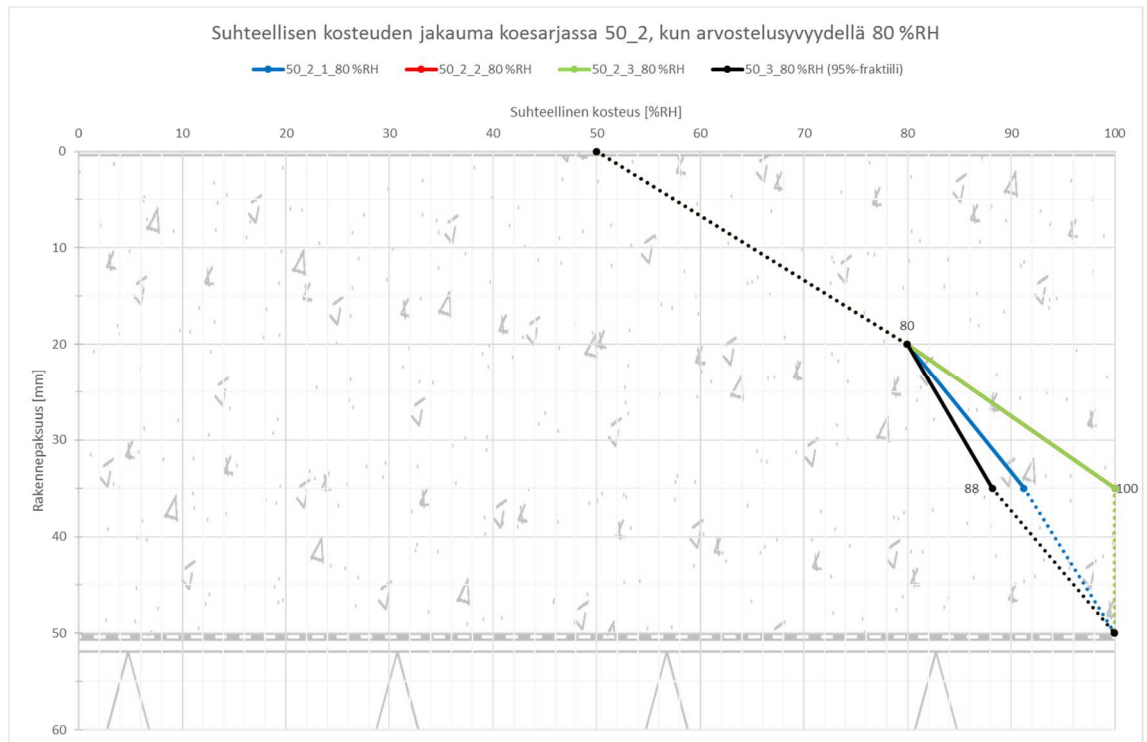












KOESARJA 50_3

Suunnitelma

Valun paksuus: 50 mm

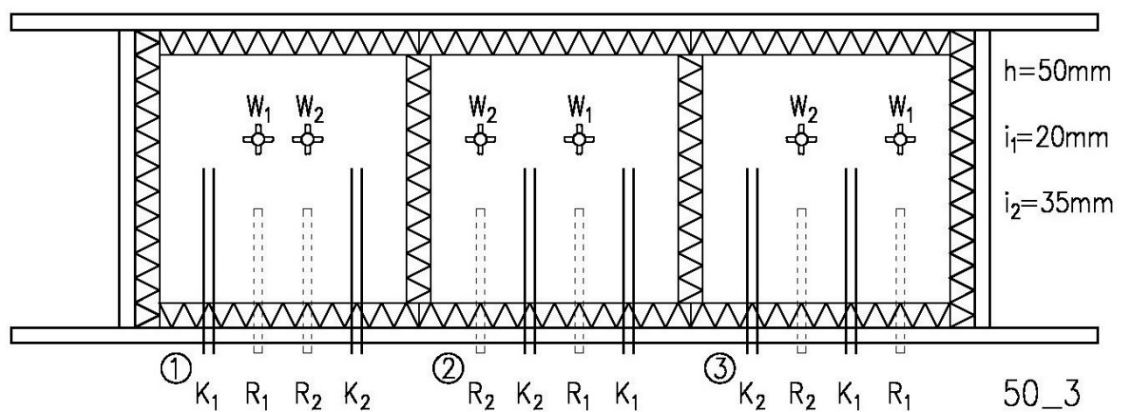
Lämmitys: Ei lämmitystä

Rotronic HC2-S antureita: 6 kpl

Wiisteen SolidRH SH1 antureita: 6kpl

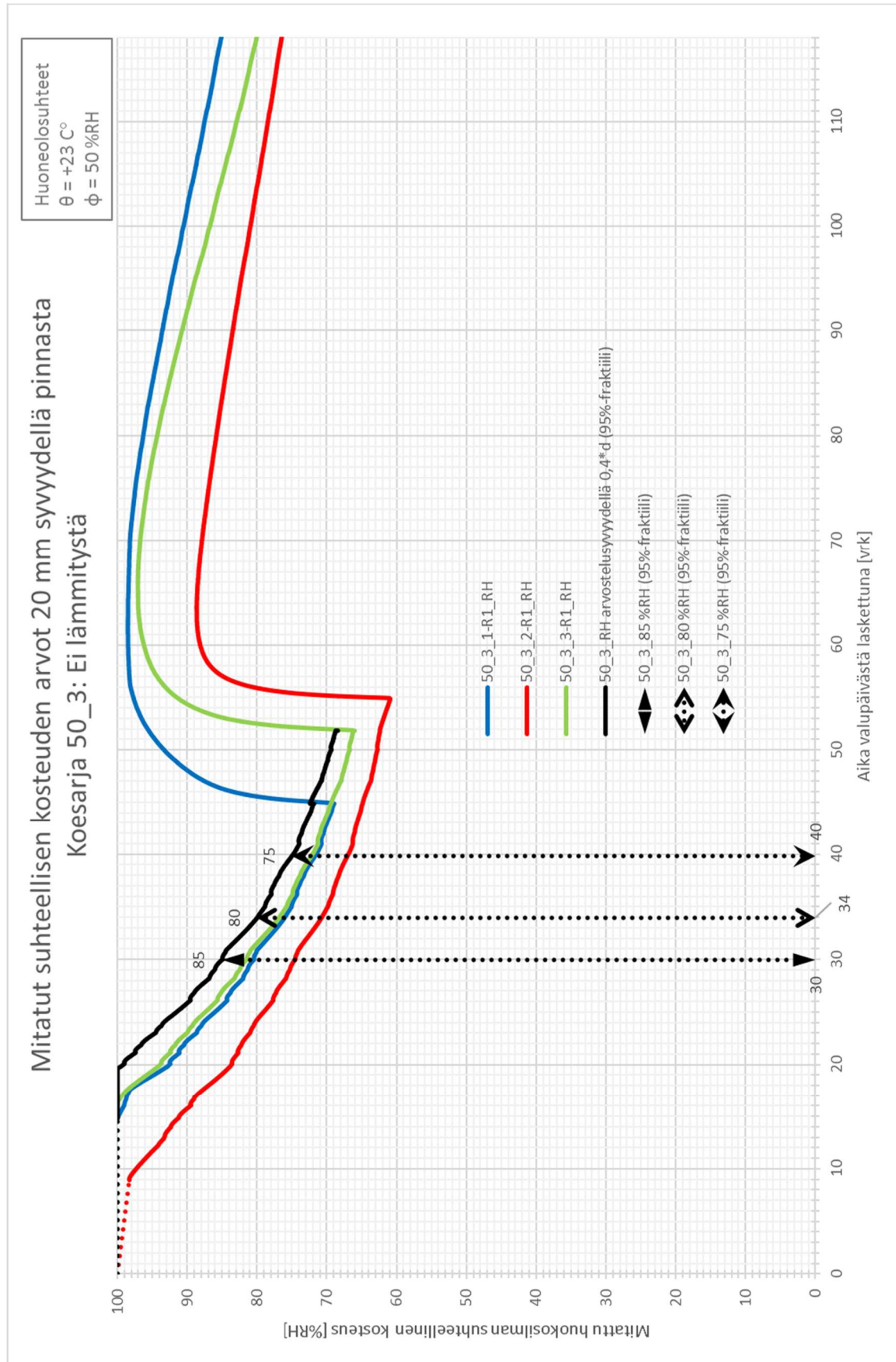
Kapasitanssineulapareja: 6 kpl

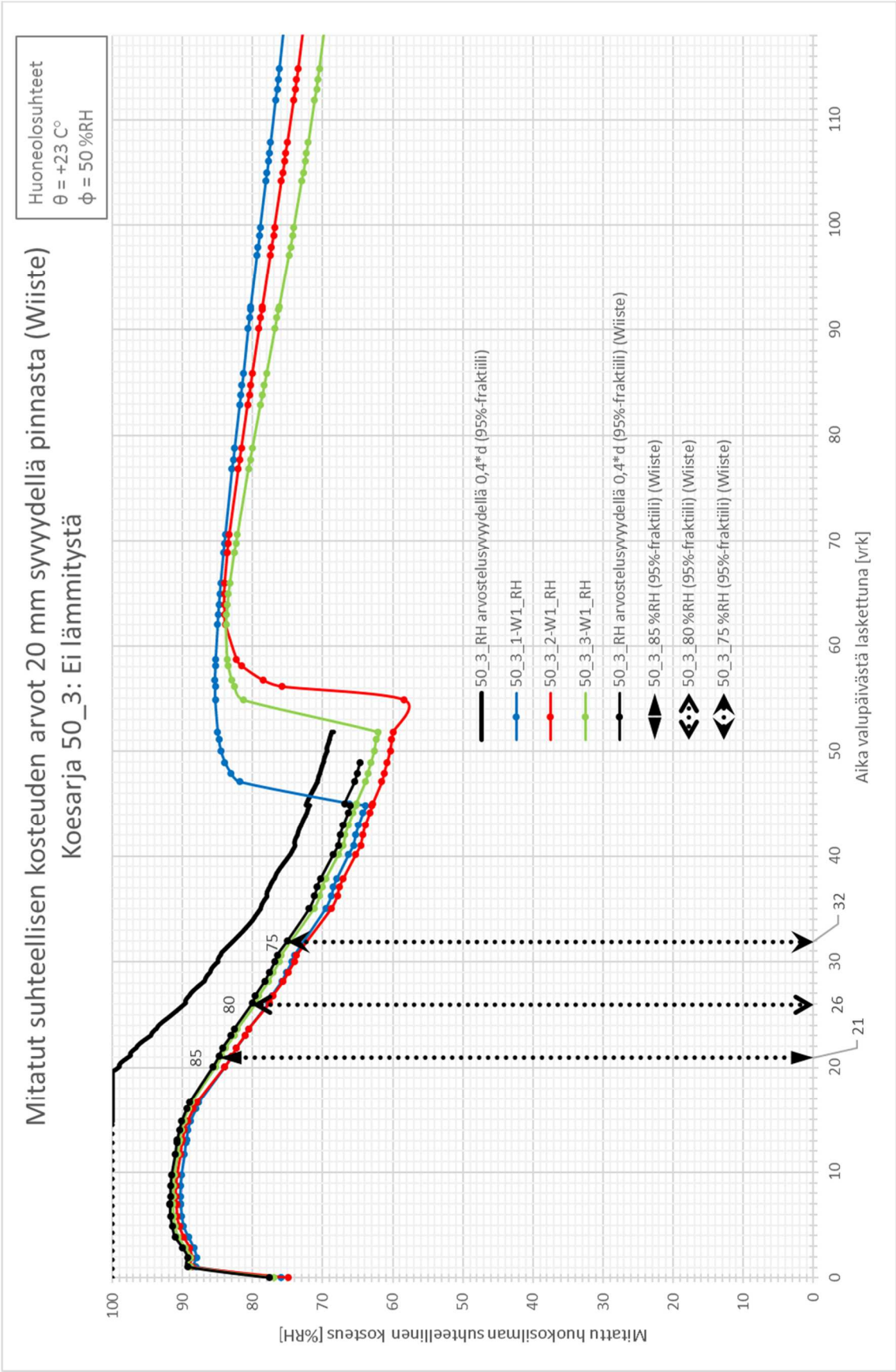
Poikkeamat suunnitelmasta: Ei poikkeamia

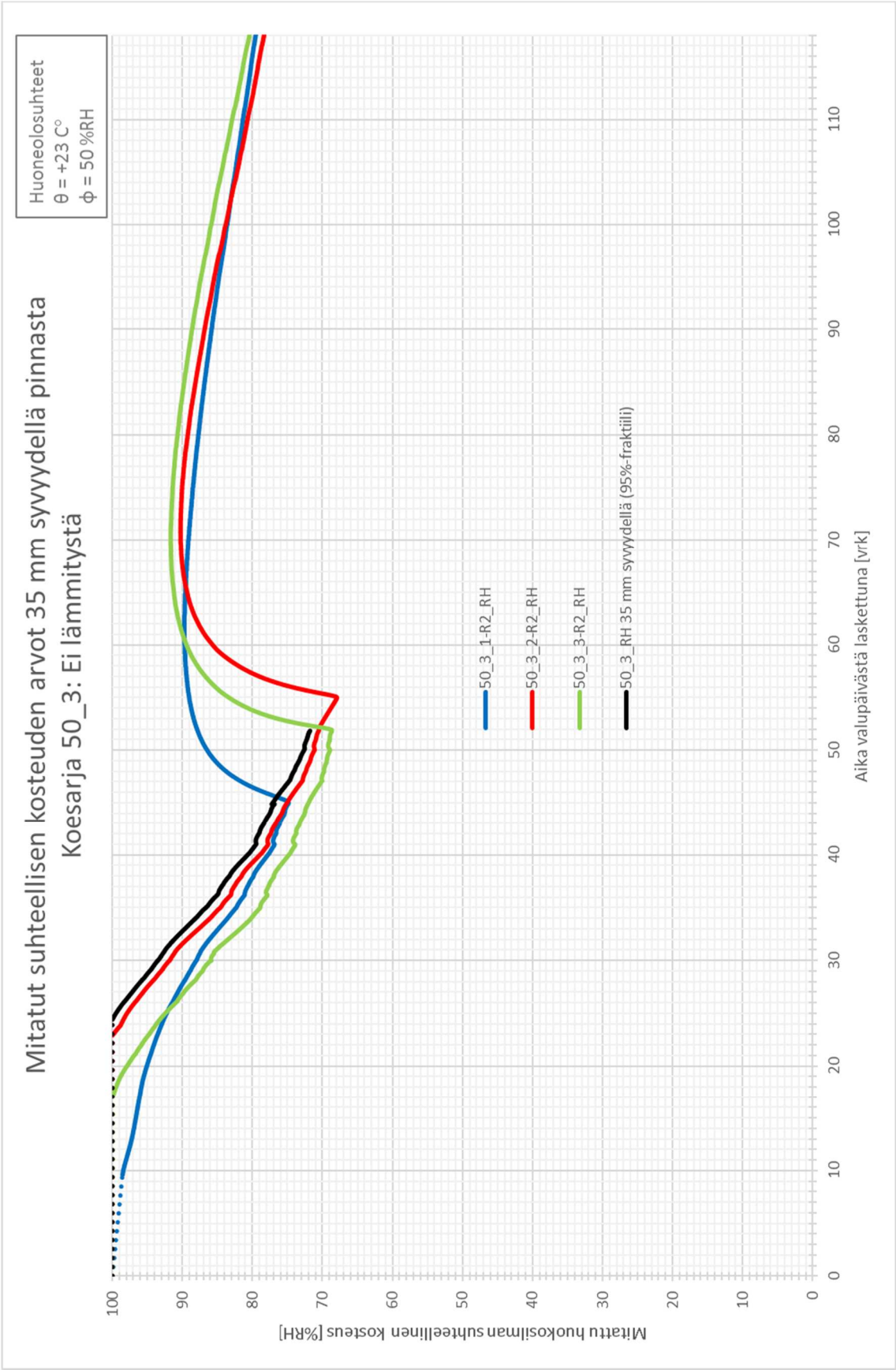


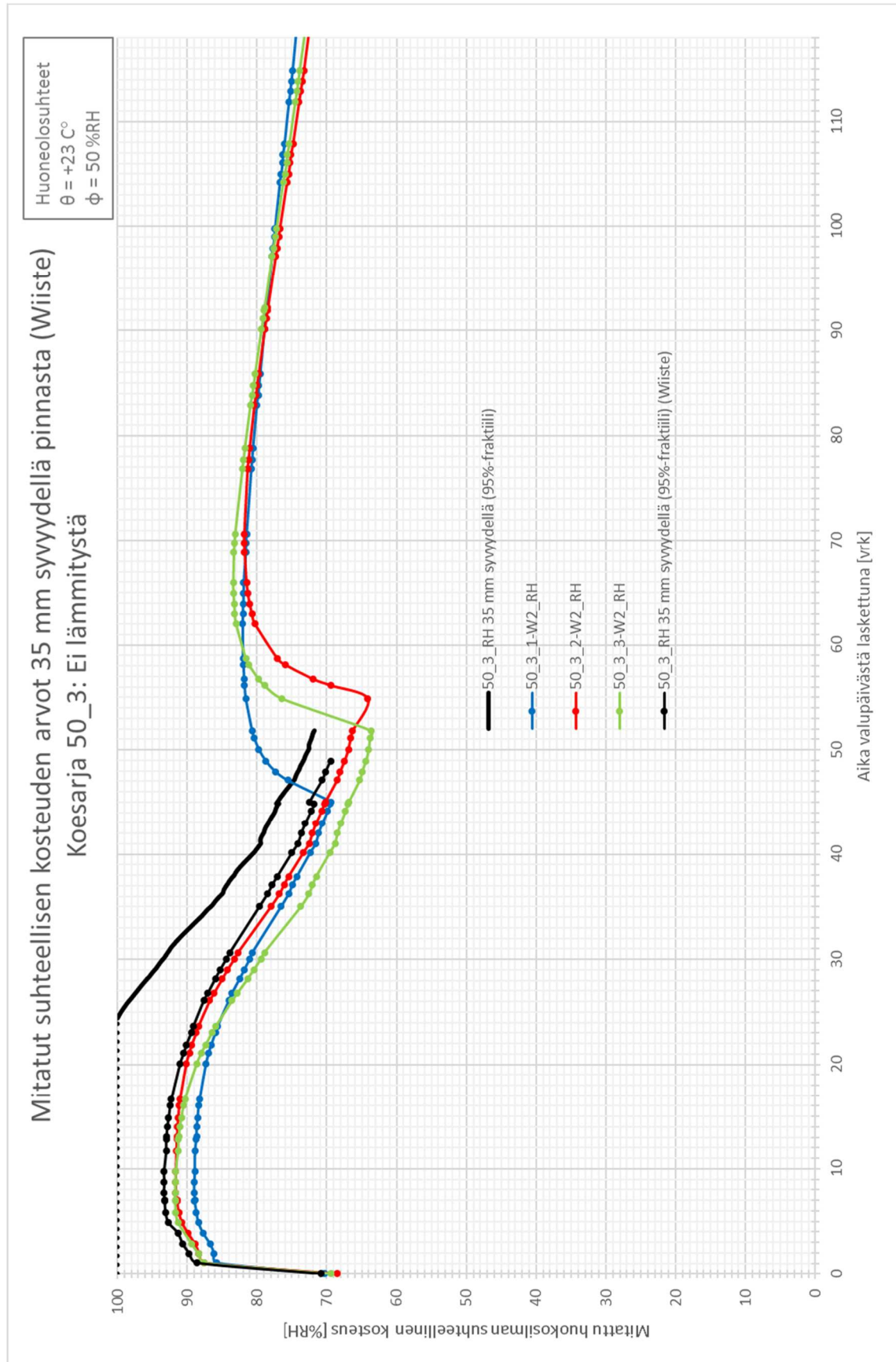
Toteutus

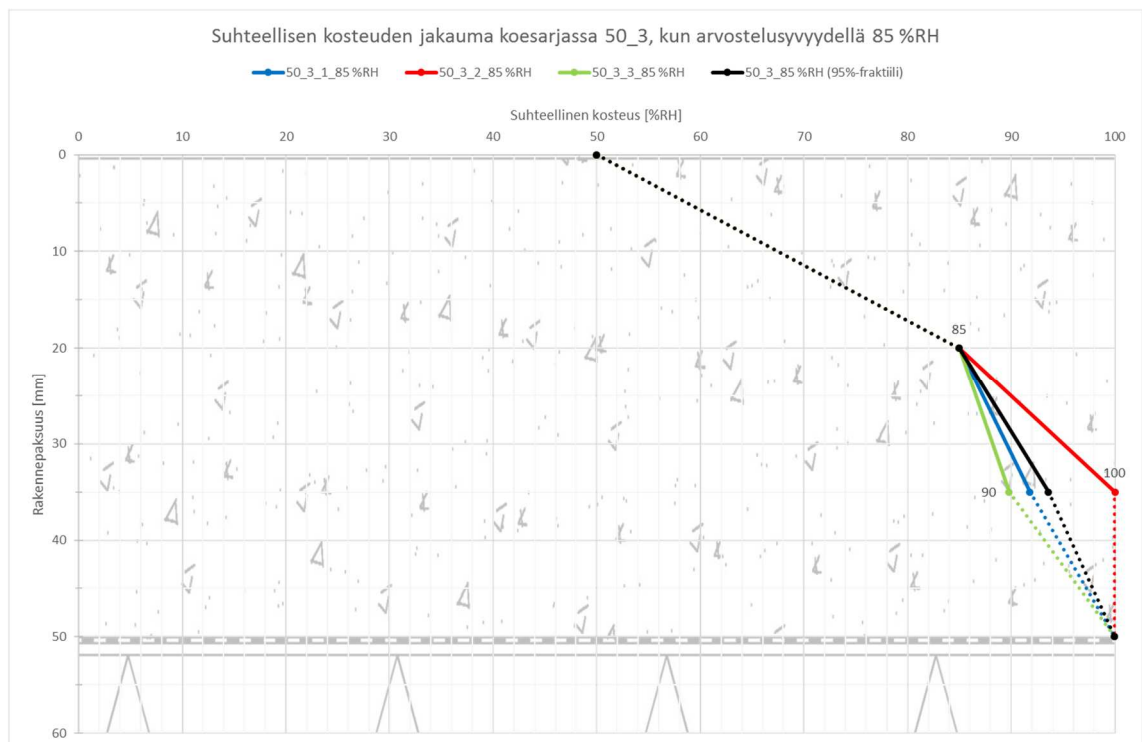
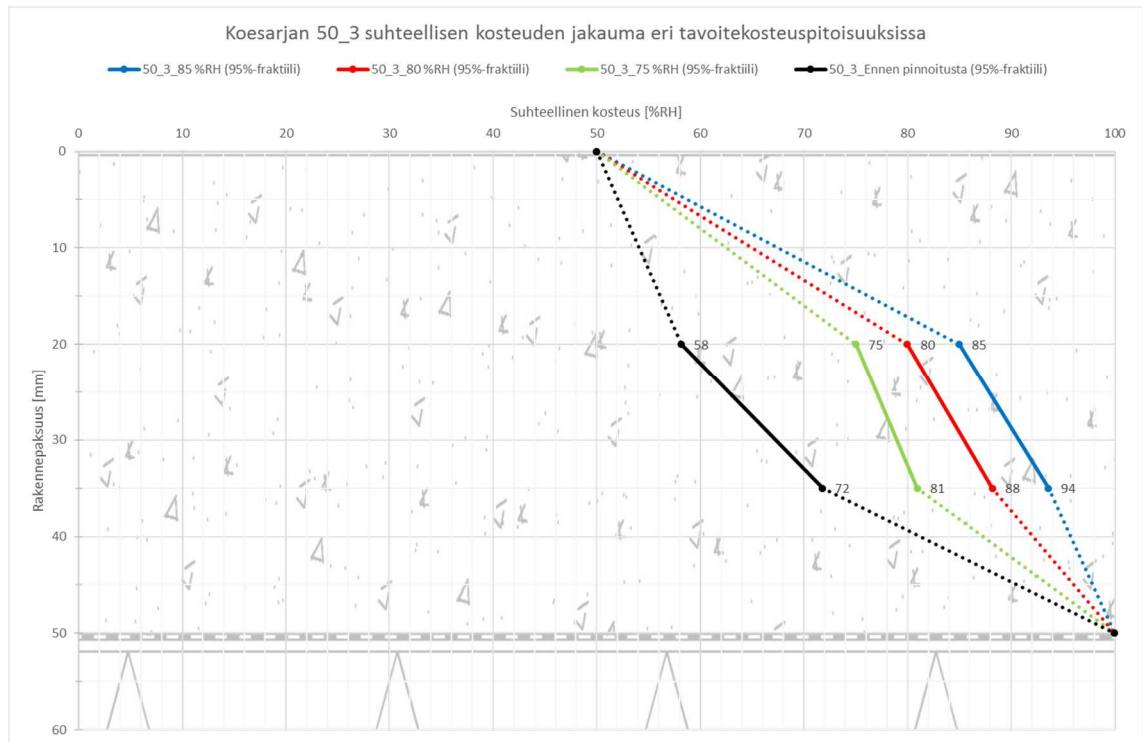


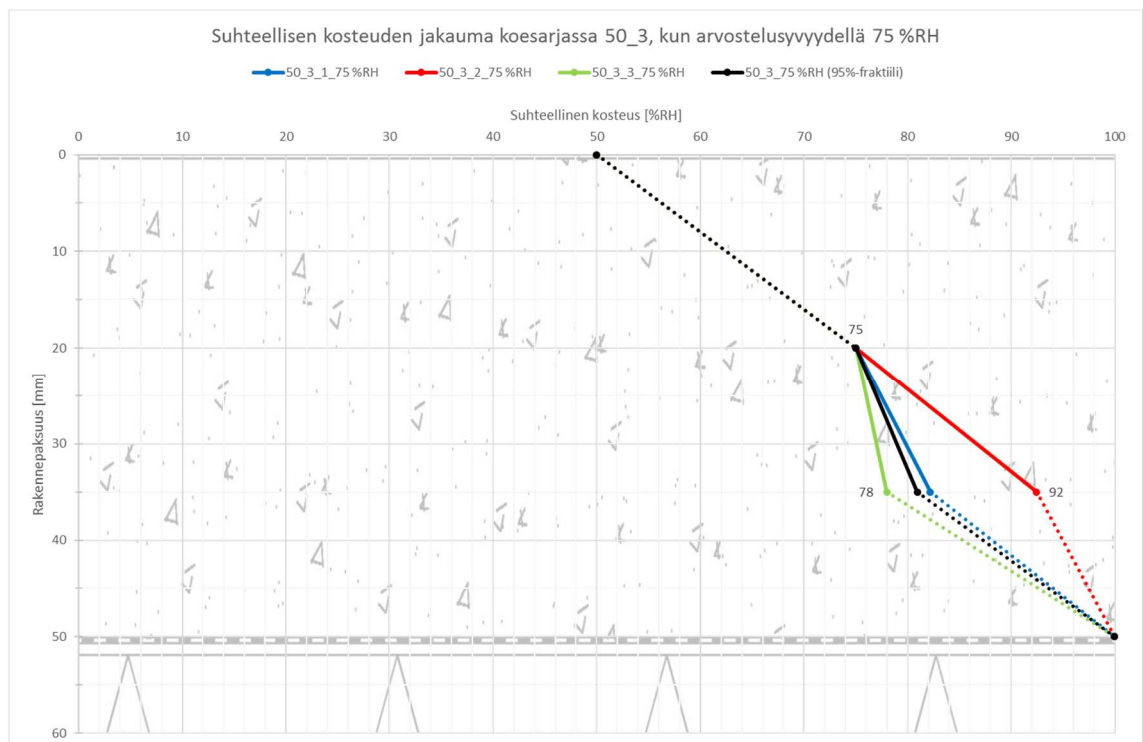
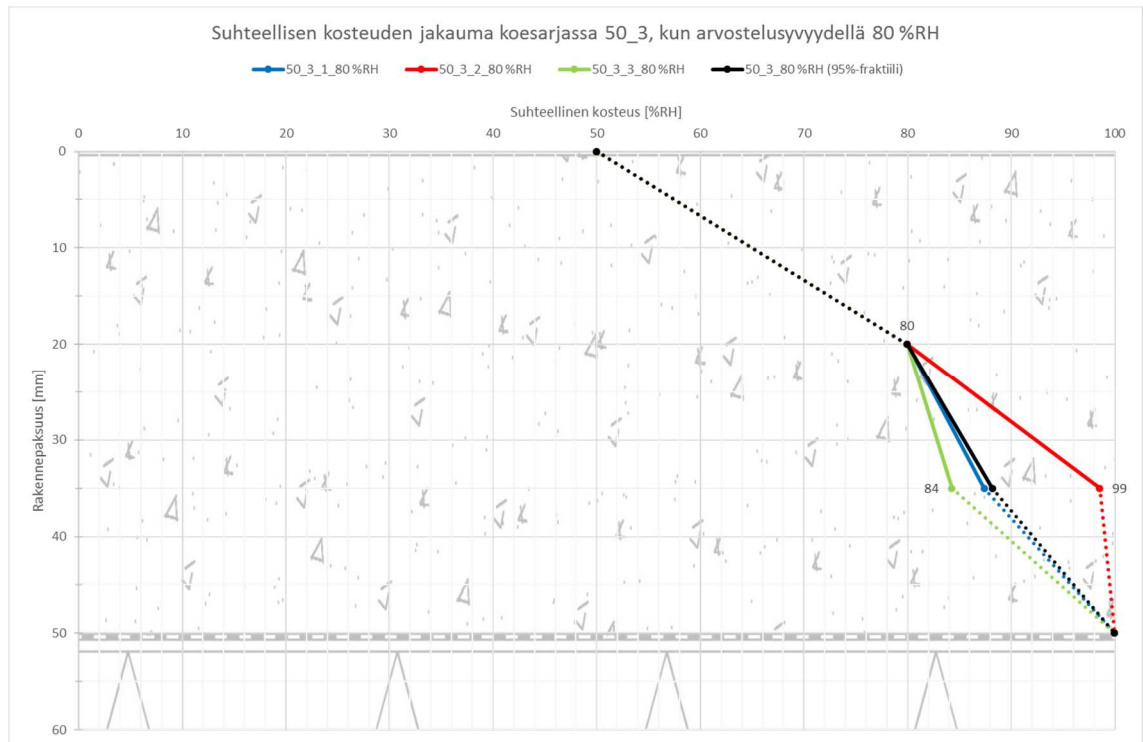


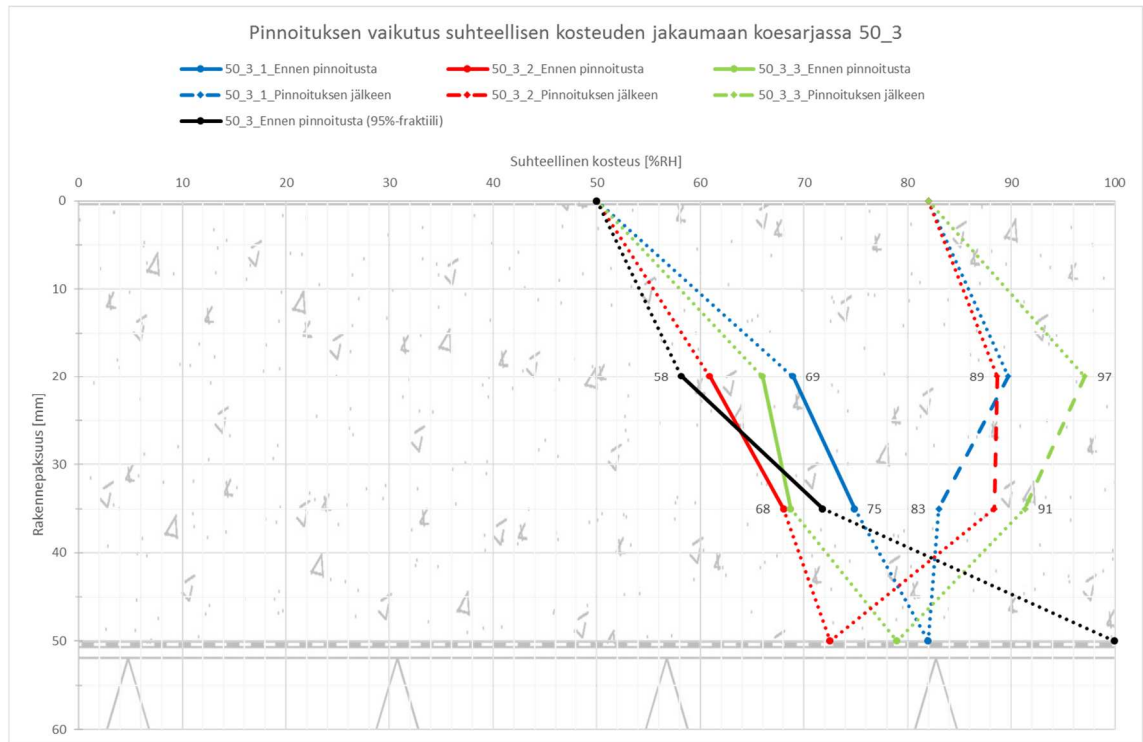












KOESARJA 50_4

Suunnitelma

Valun paksuus: 50 mm

Lämmitys: Ei lämmitystä

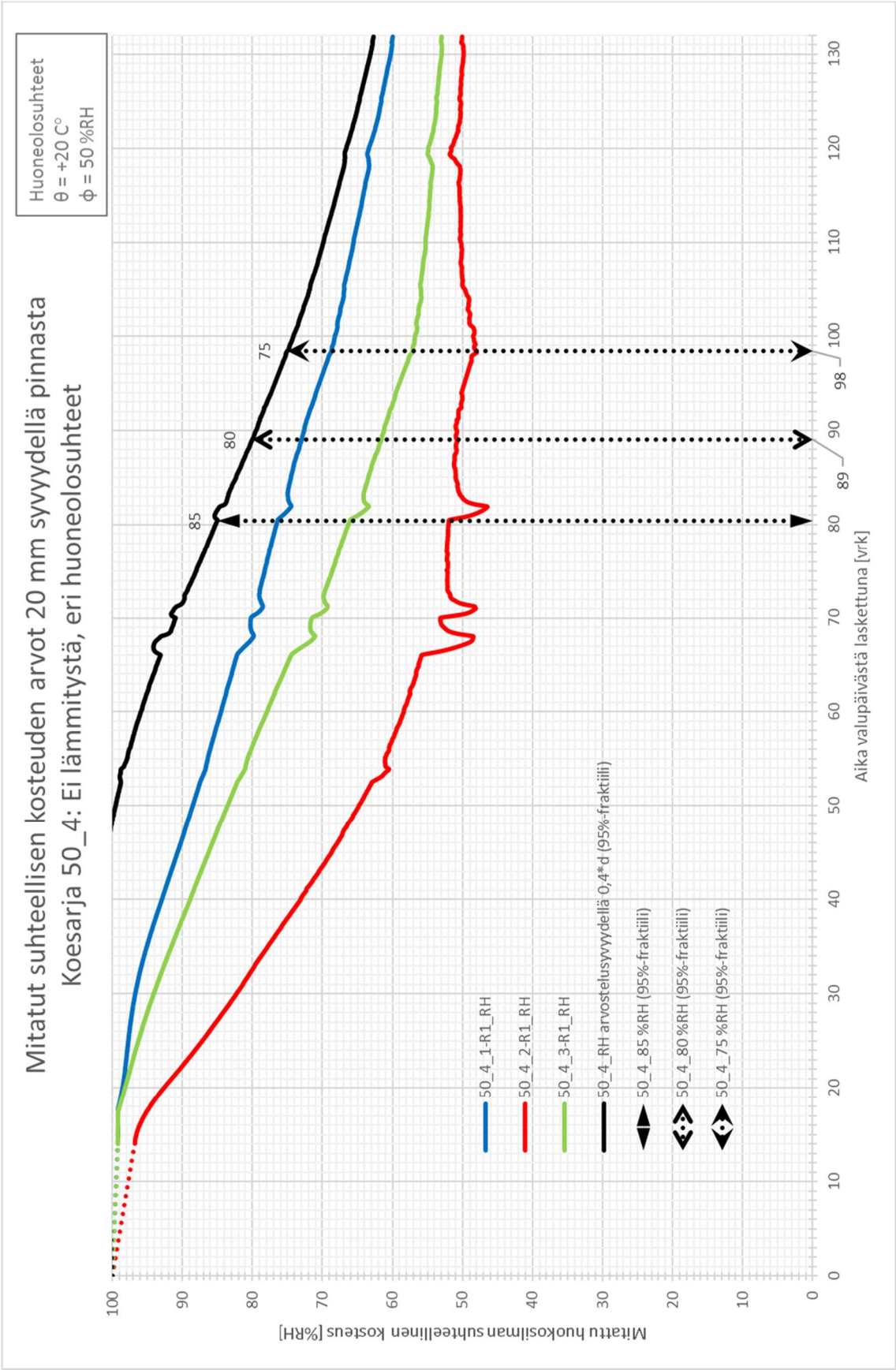
Rotronic HC2-S antureita: 6 kpl

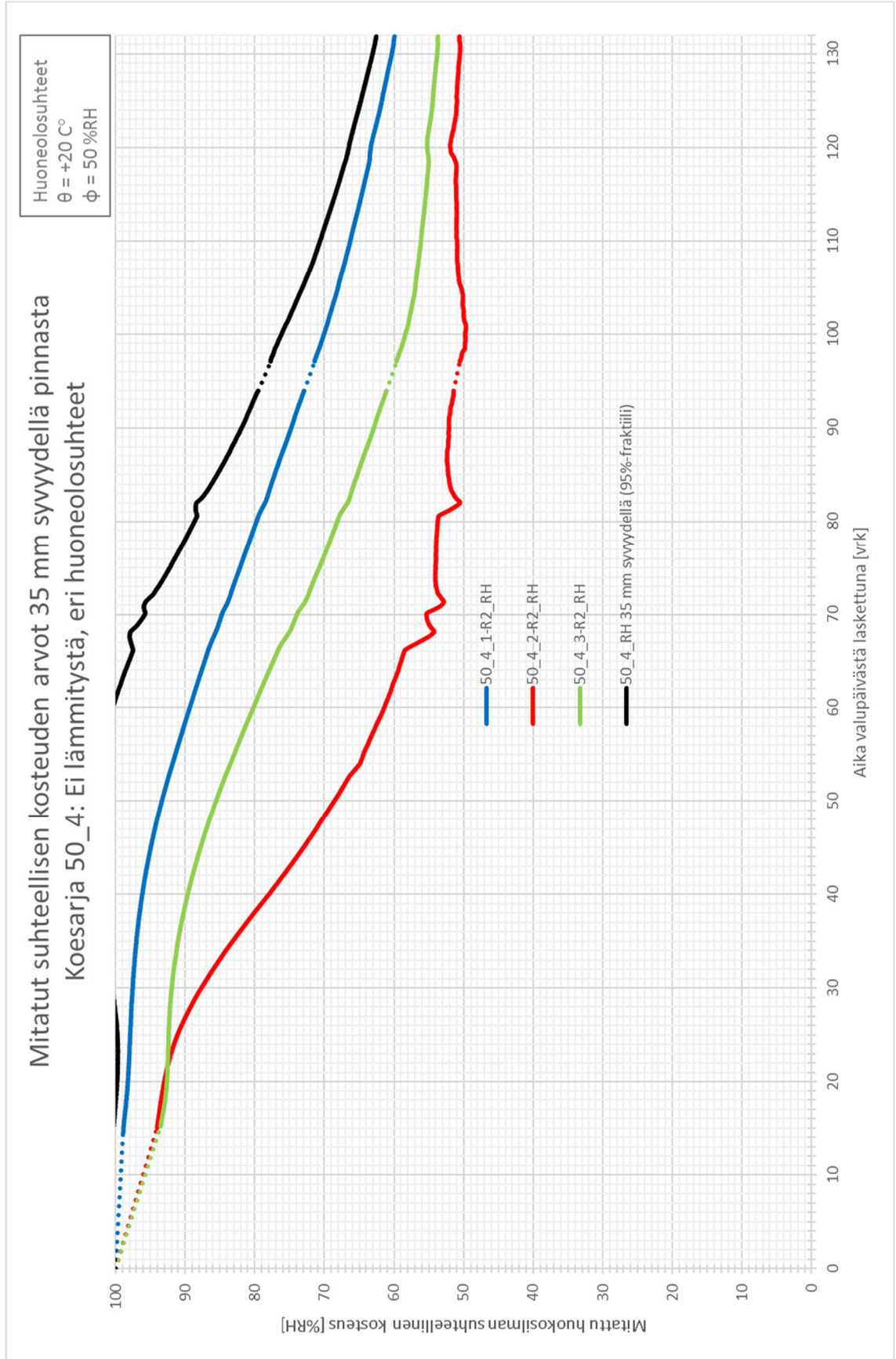
Kapasitanssineulapareja: 6 kpl

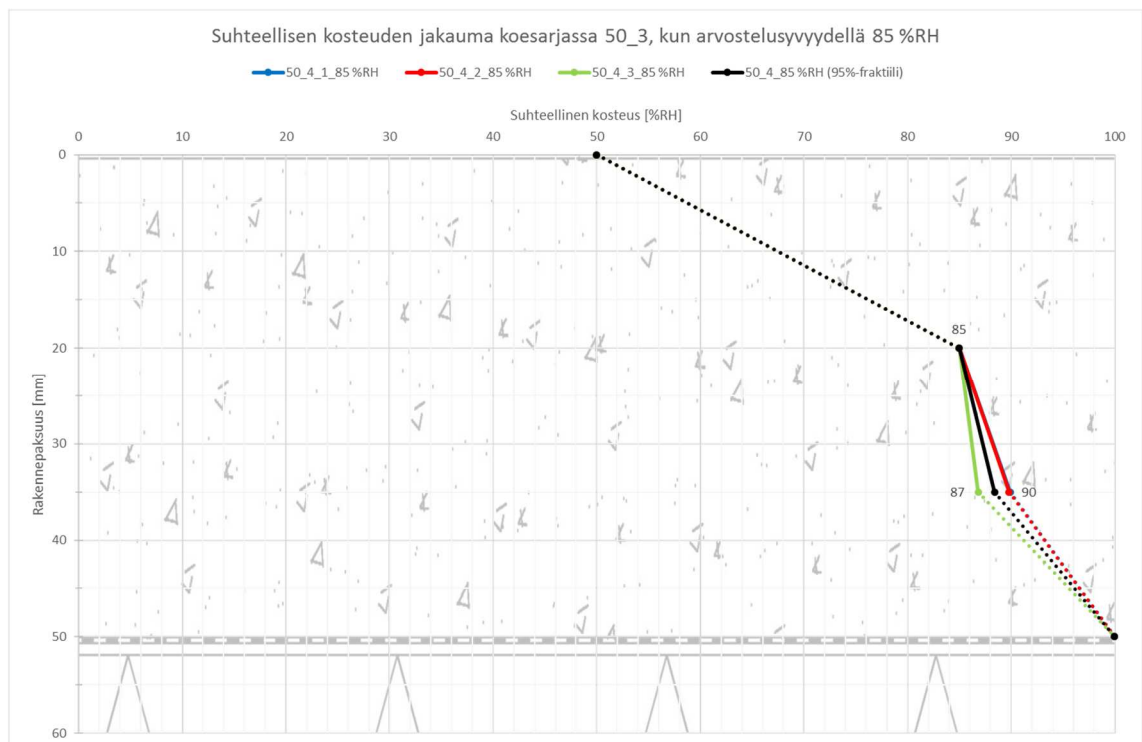
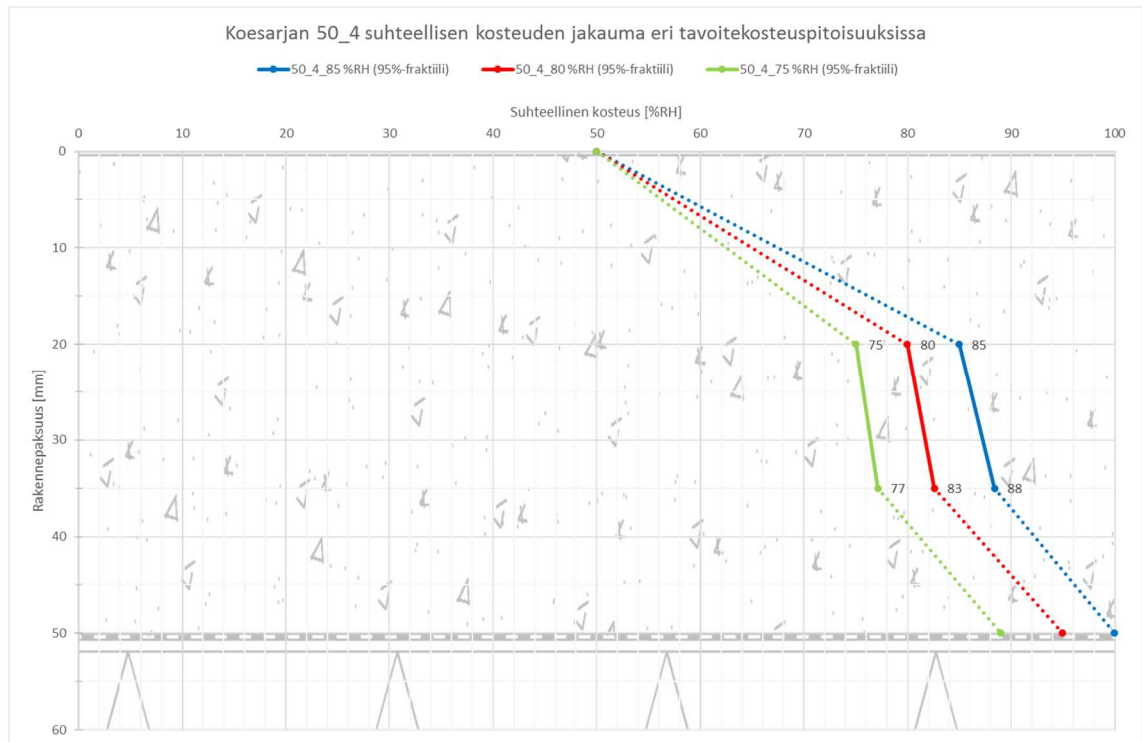
Poikkeamat suunnitelmasta: Ei poikkeamia

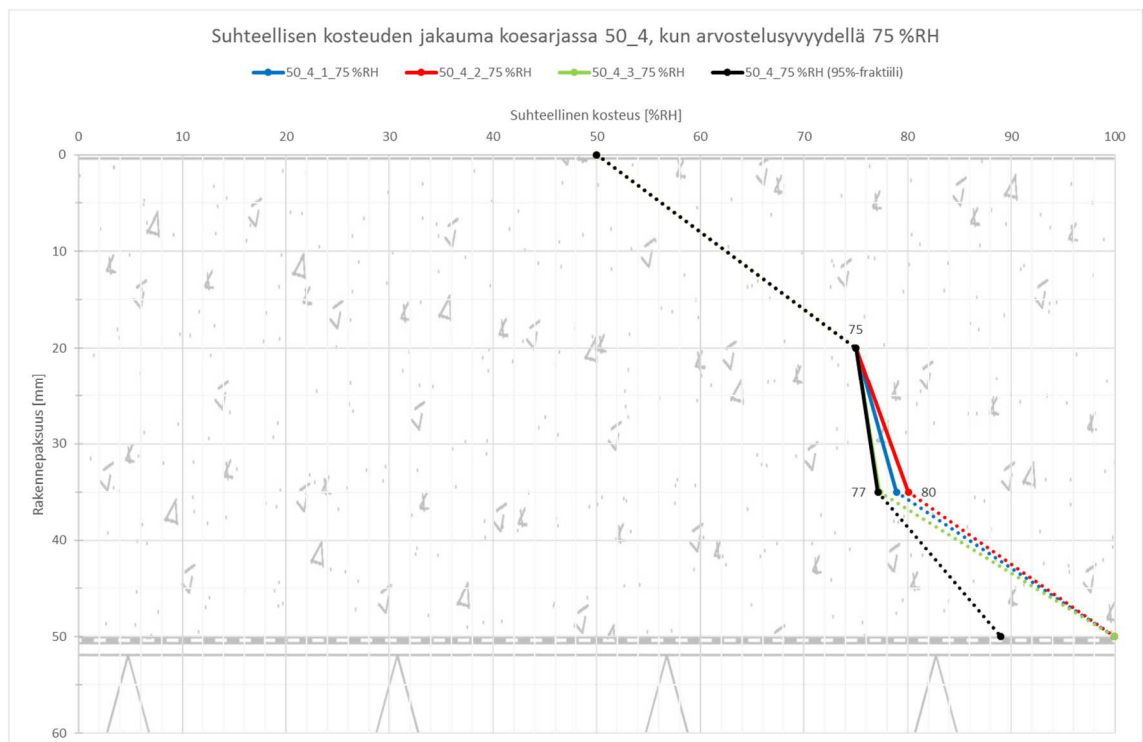
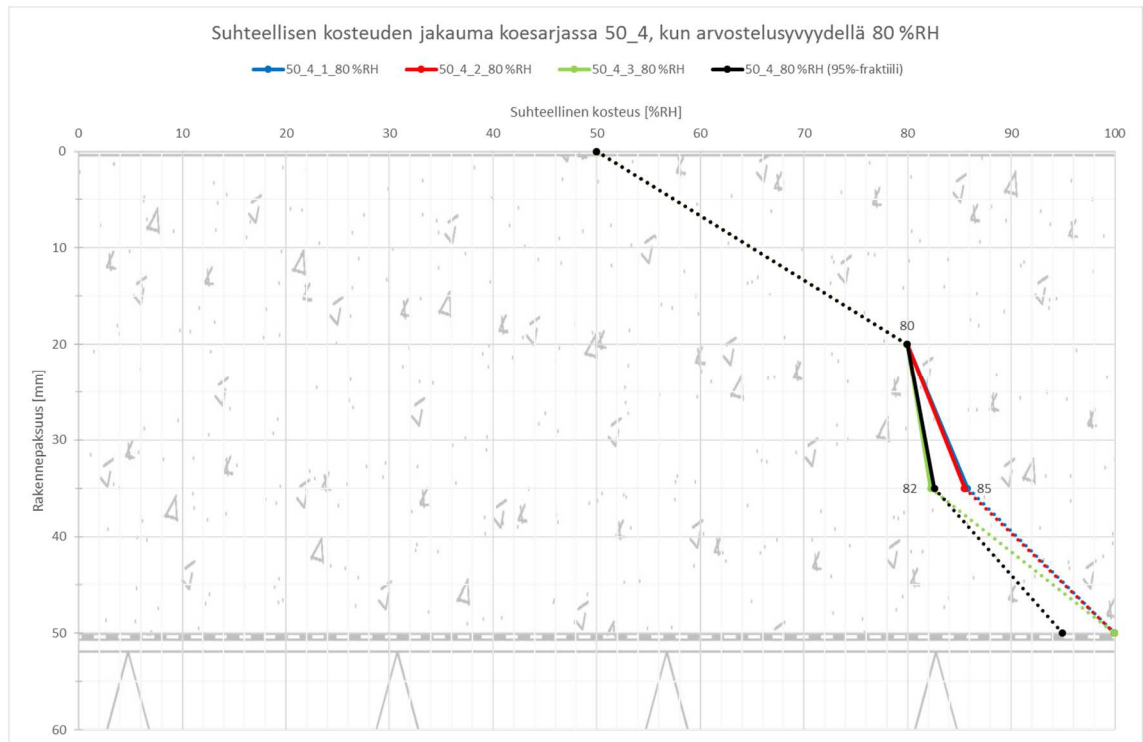
Toteutus











KOESARJA 80_1

Suunnitelma

Valun paksuus: 80 mm

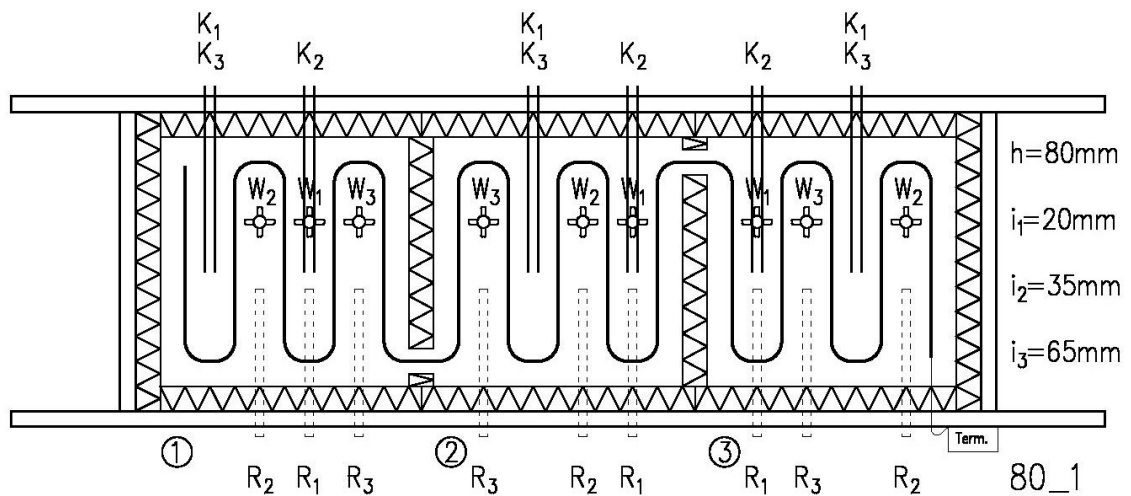
Lämmitys: 7 vrk ilman lämmitystä, sen jälkeen 25 °C jatkuva

Rotronic HC2-S antureita: 9 kpl

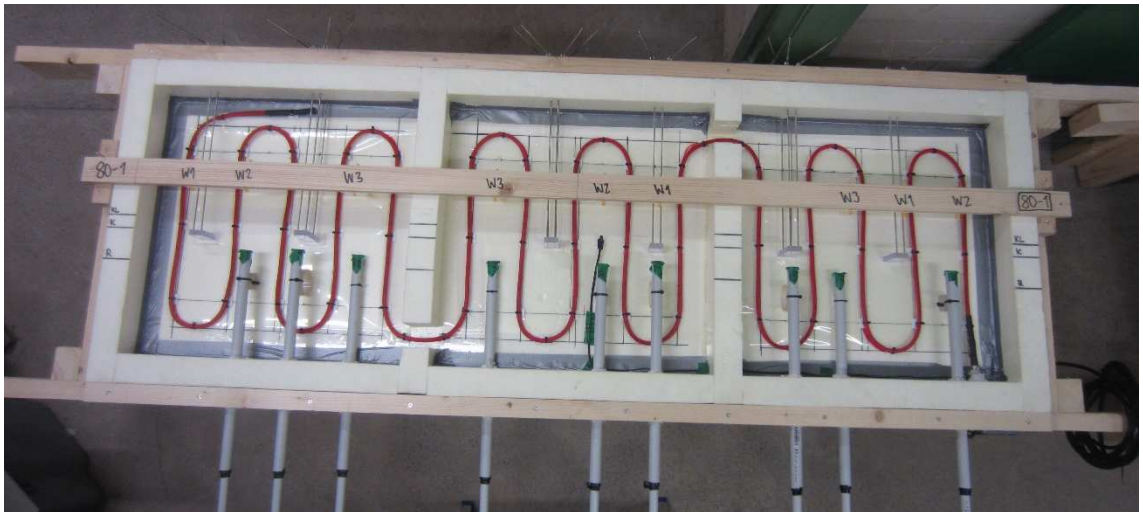
Wiisteen SolidRH SH1 antureita: 9 kpl

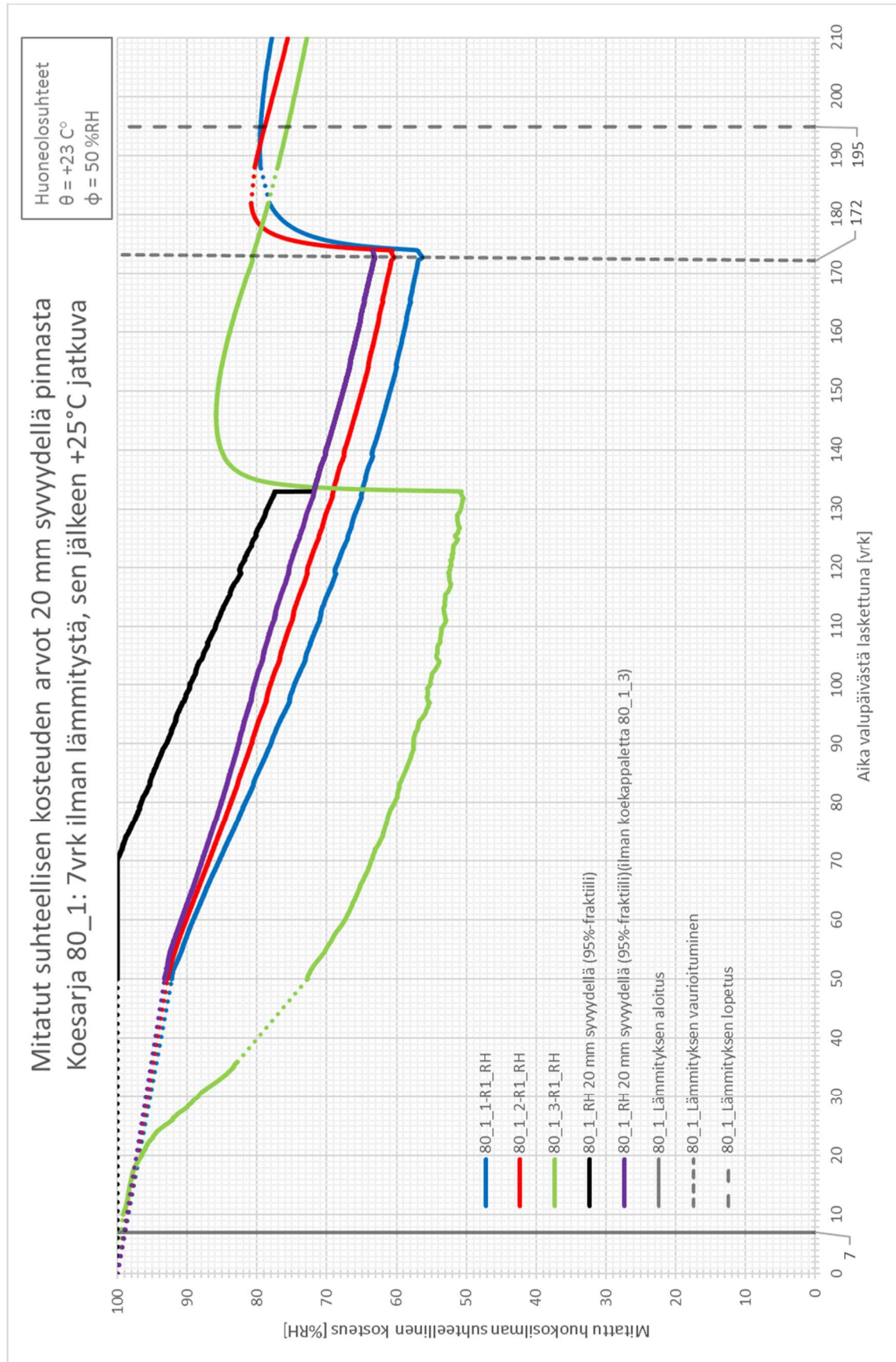
Kapasitanssineulapareja: 9 kpl

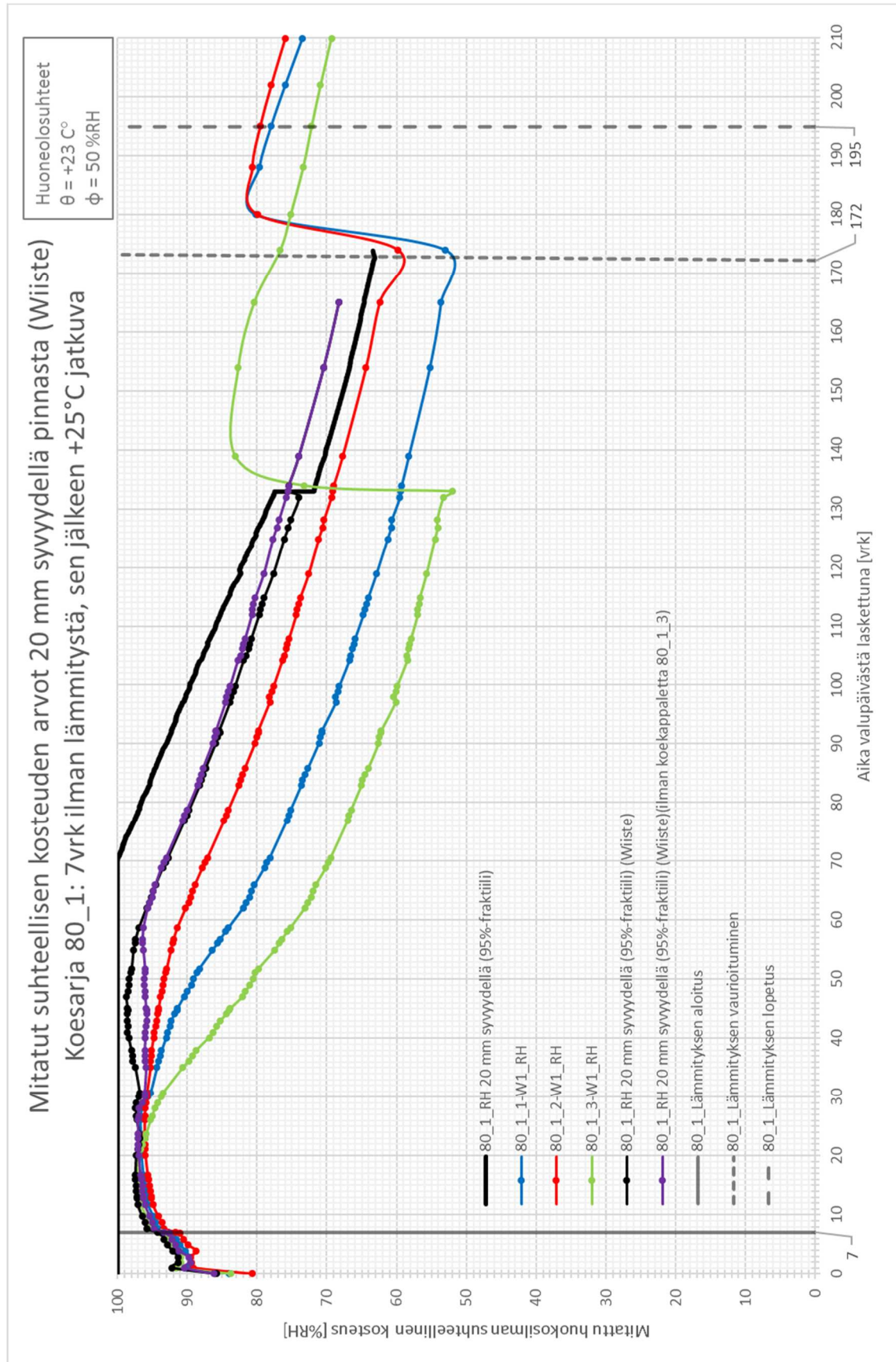
Poikkeamat suunnitelmasta: Ei poikkeamia

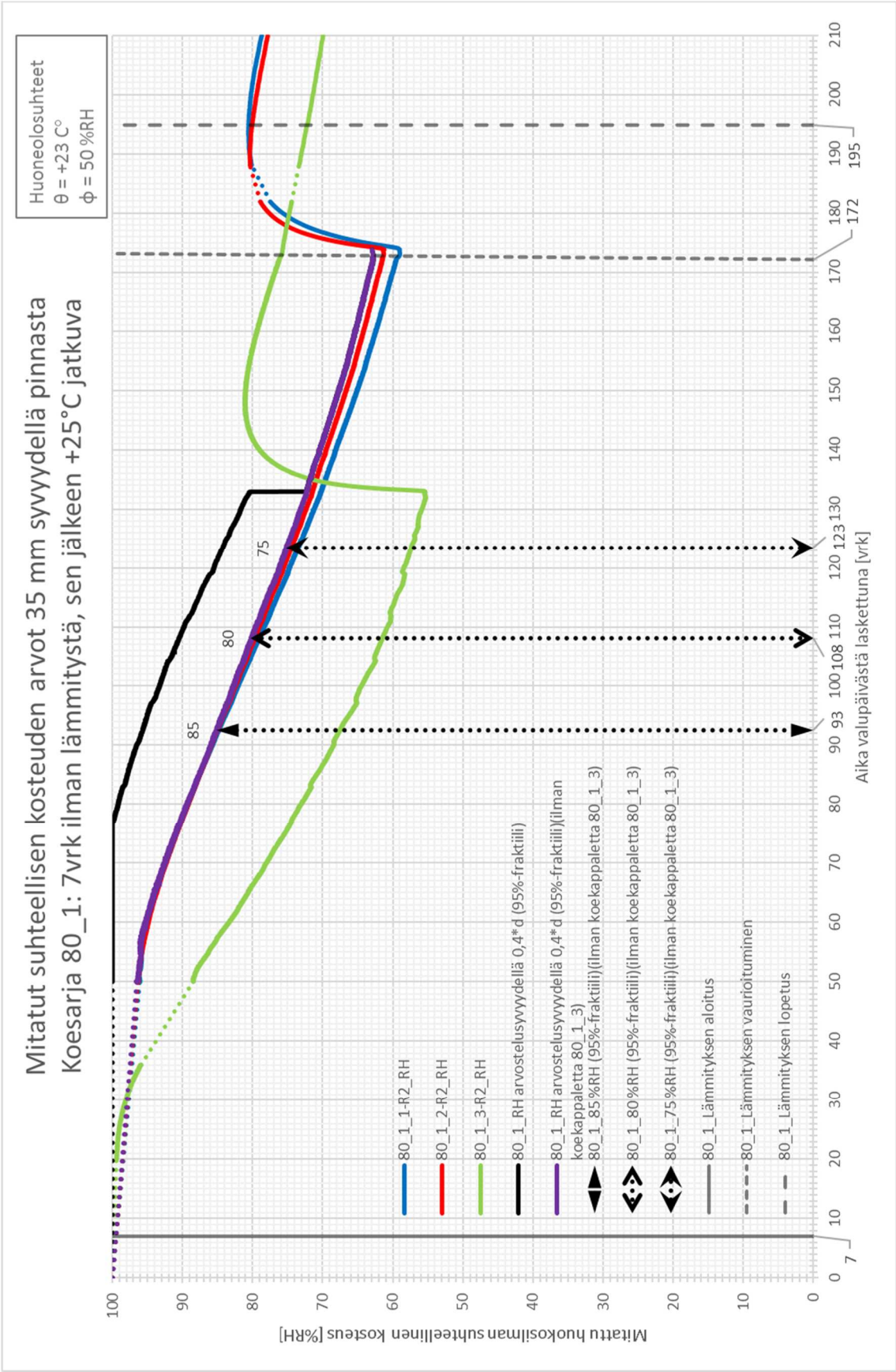


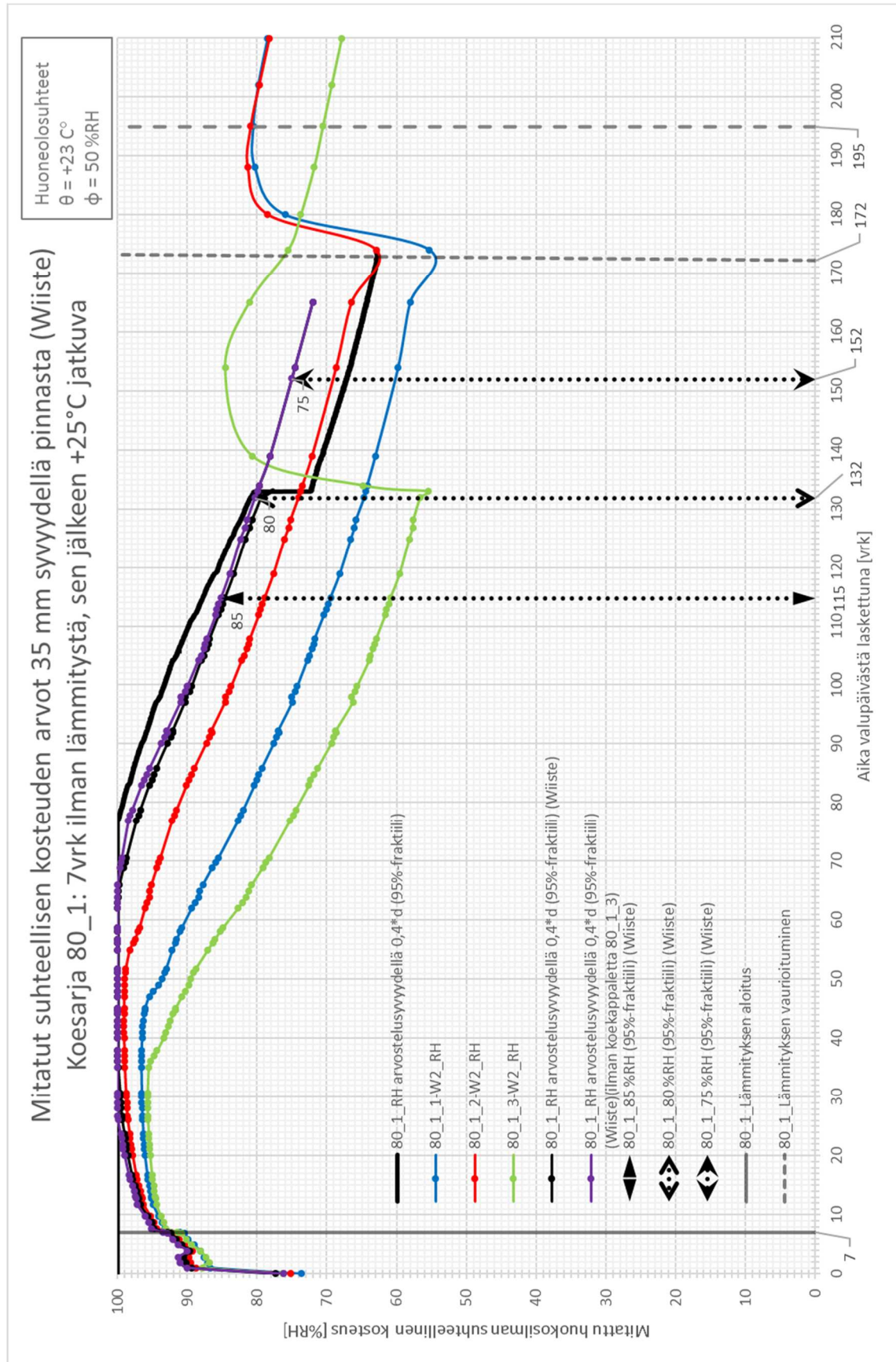
Toteutus

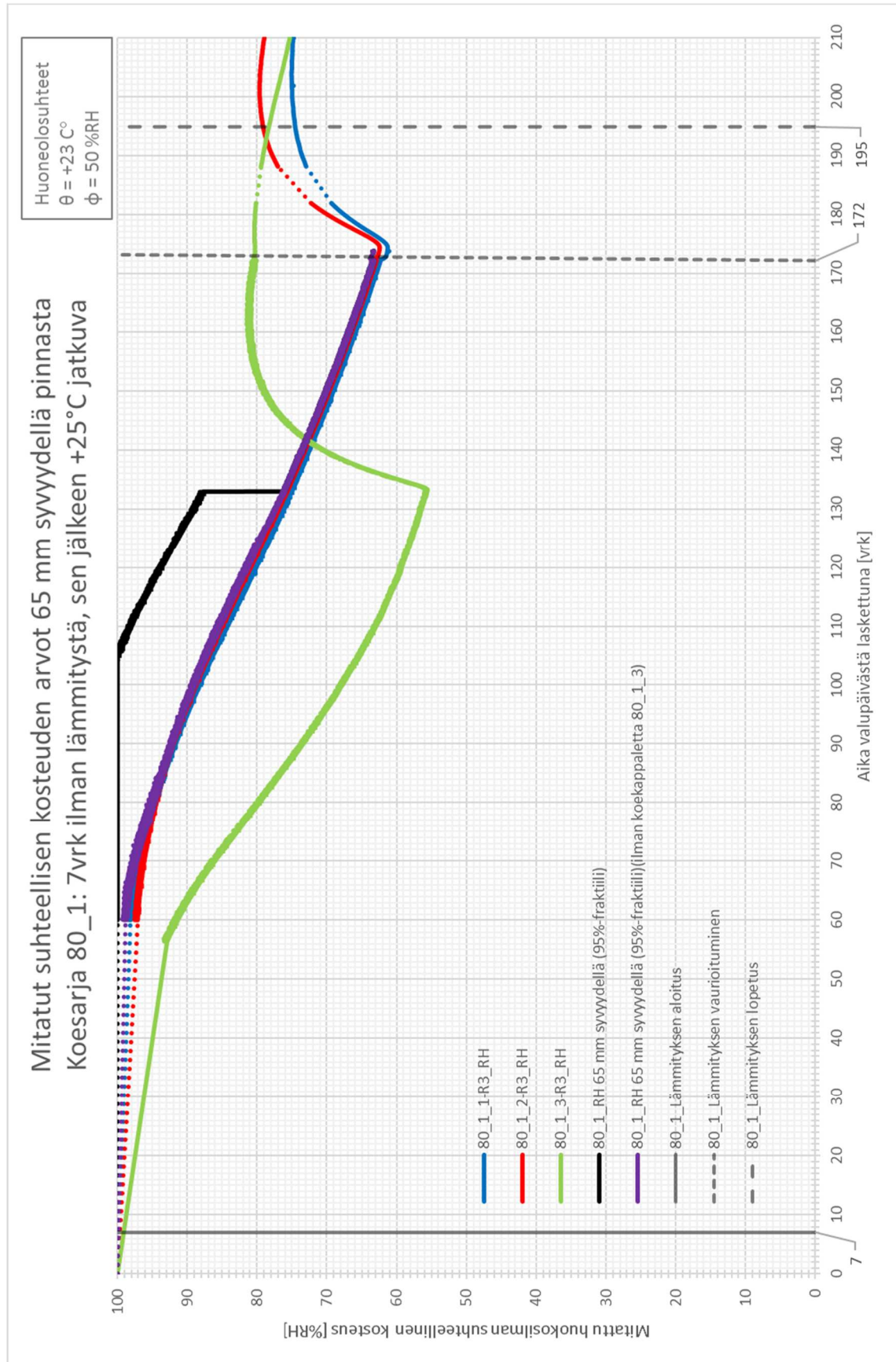


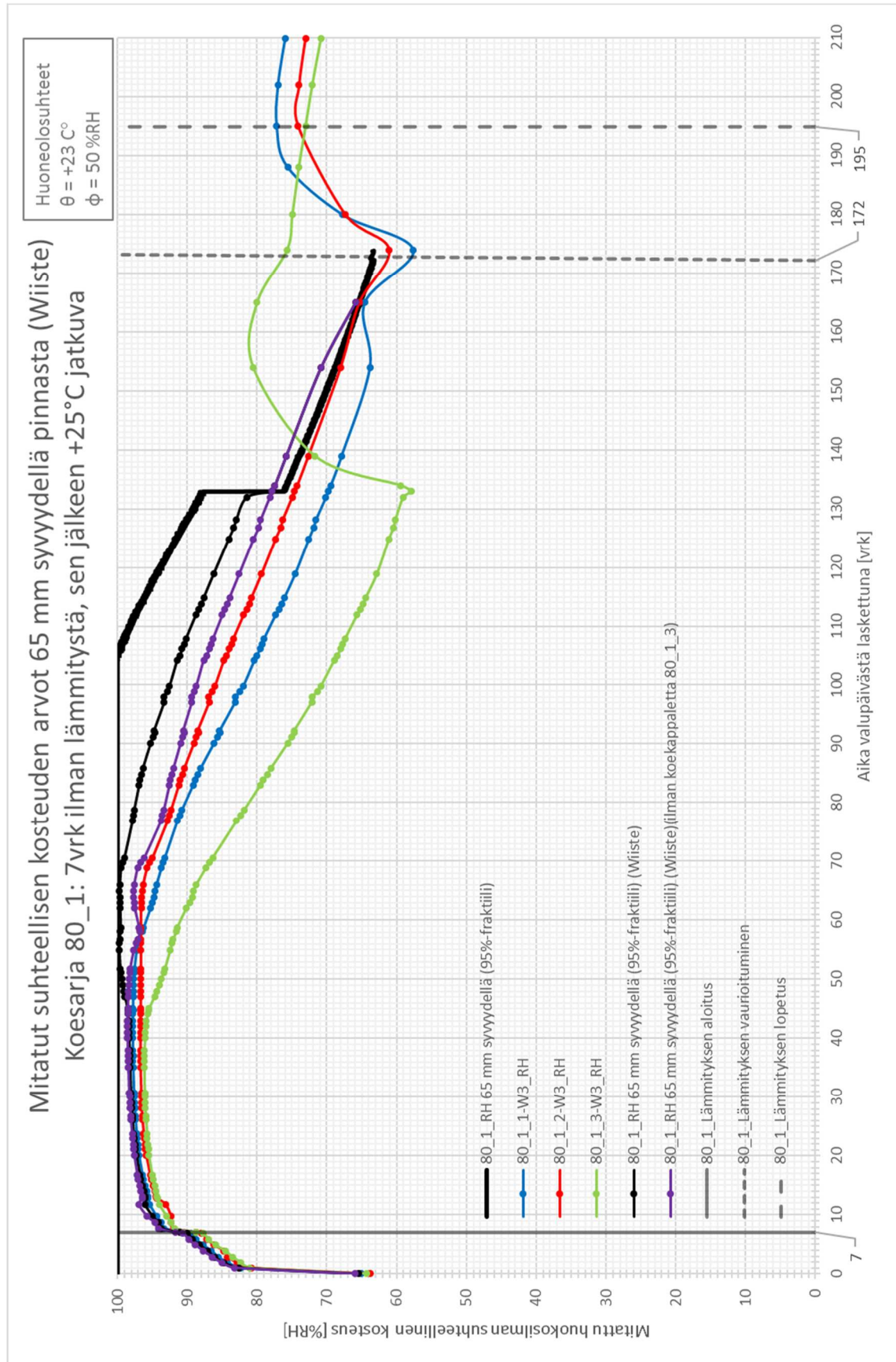


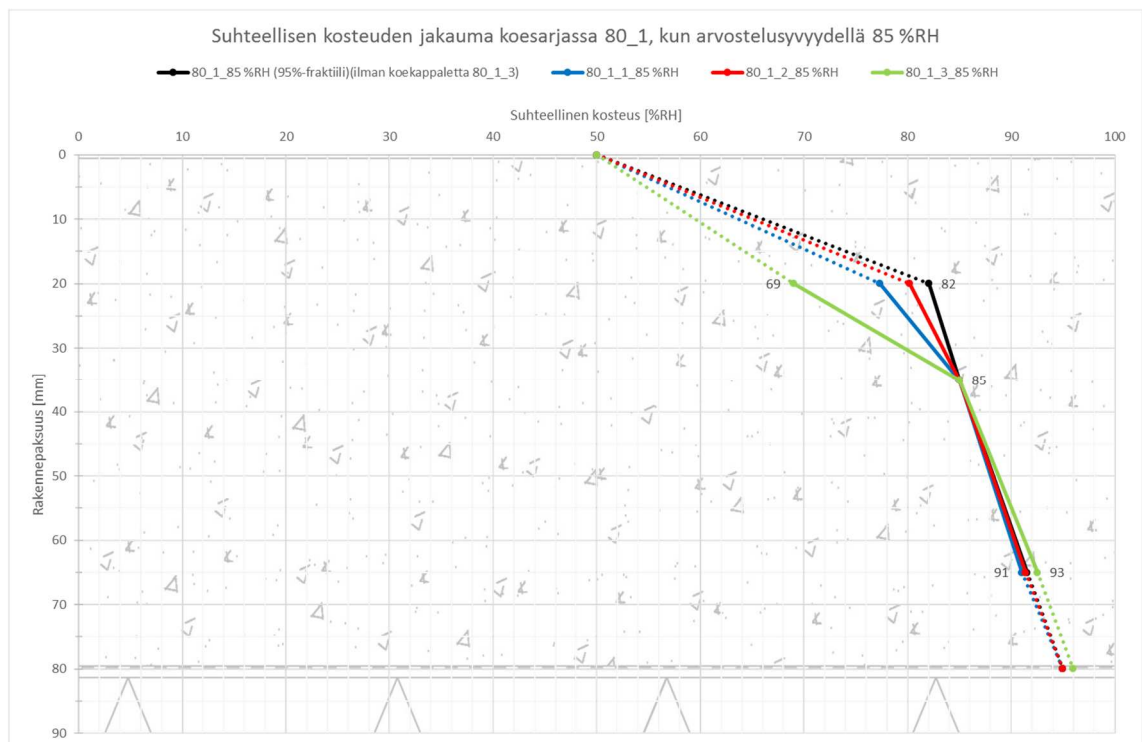
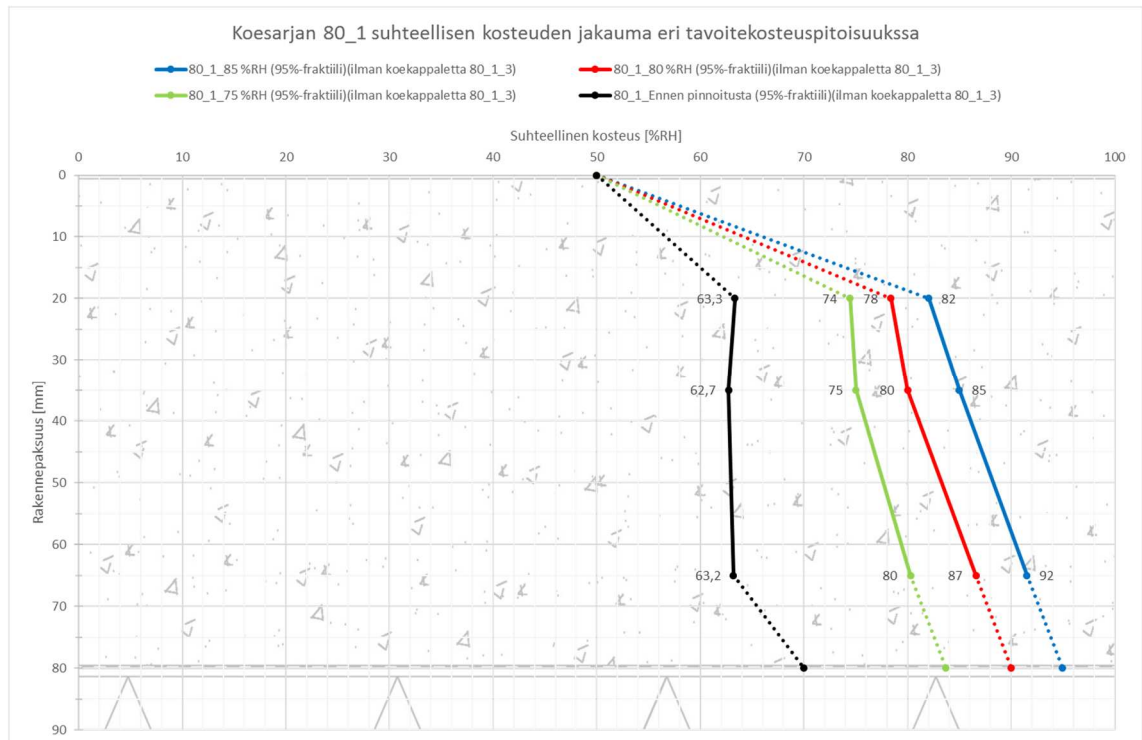


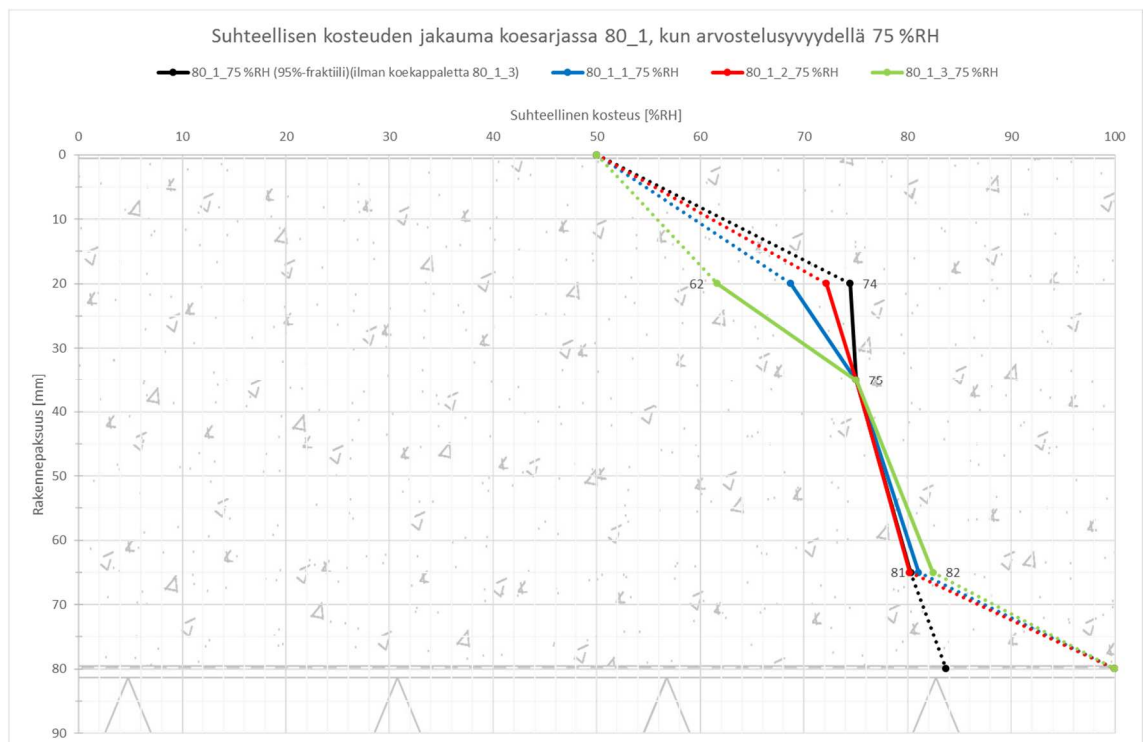
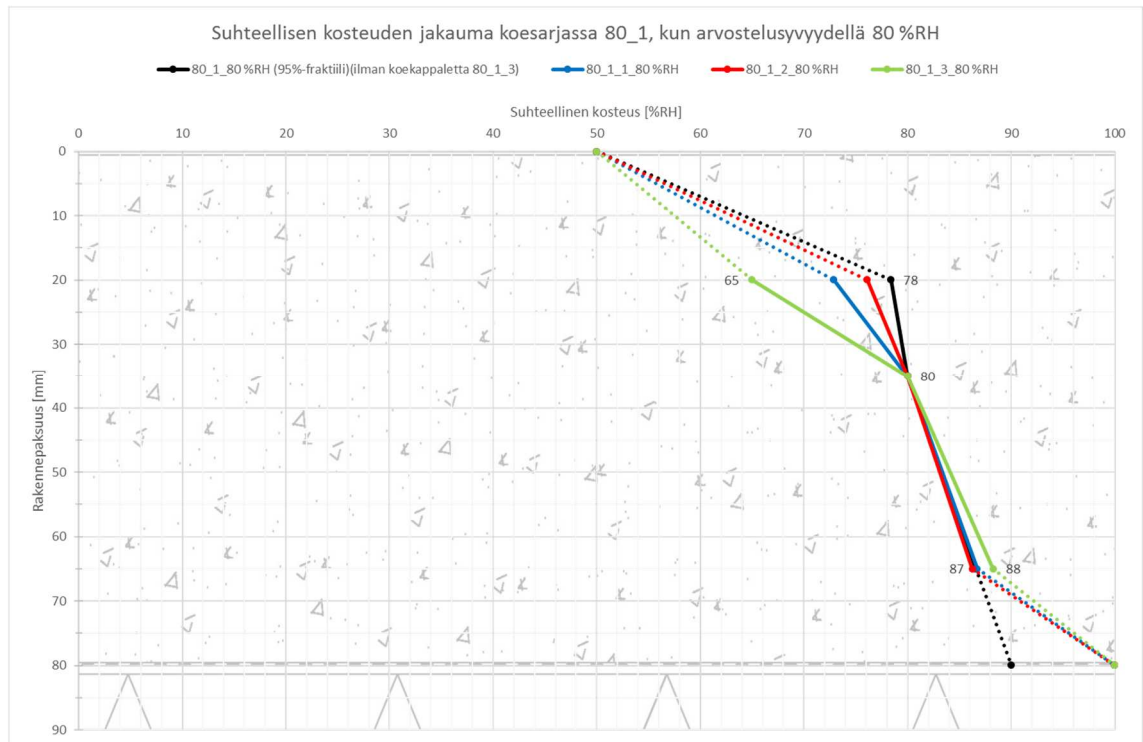


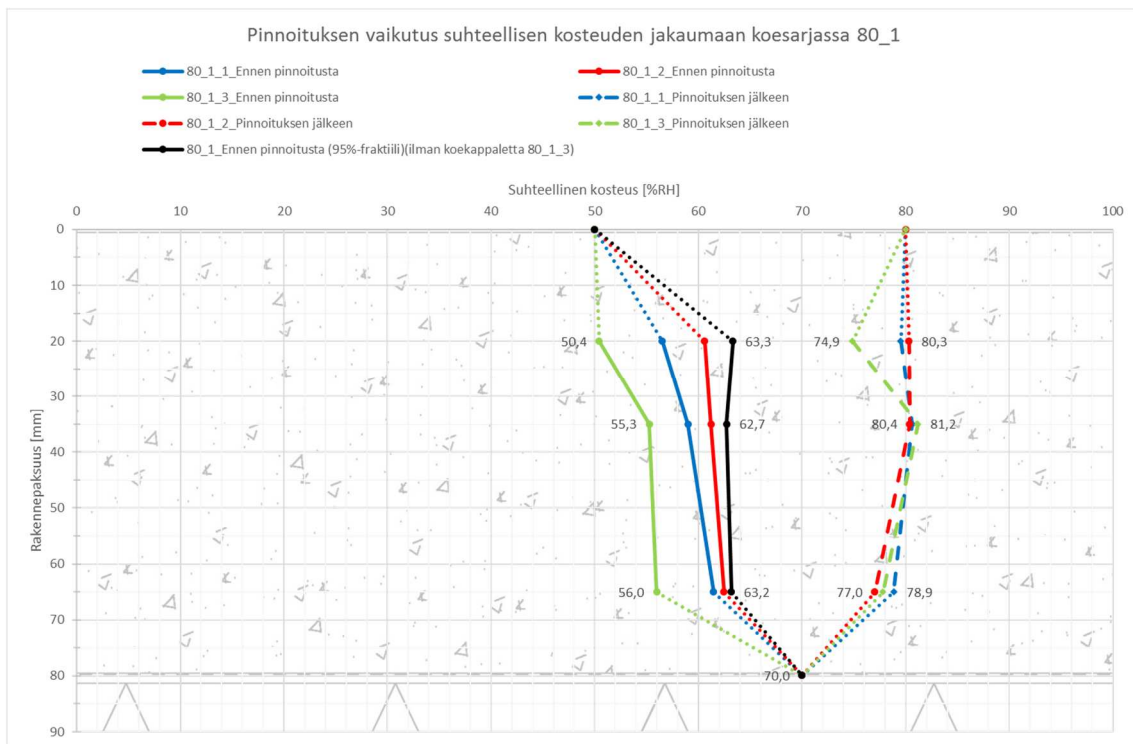












KOESARJA 80_2

Suunnitelma

Valun paksuus: 80 mm

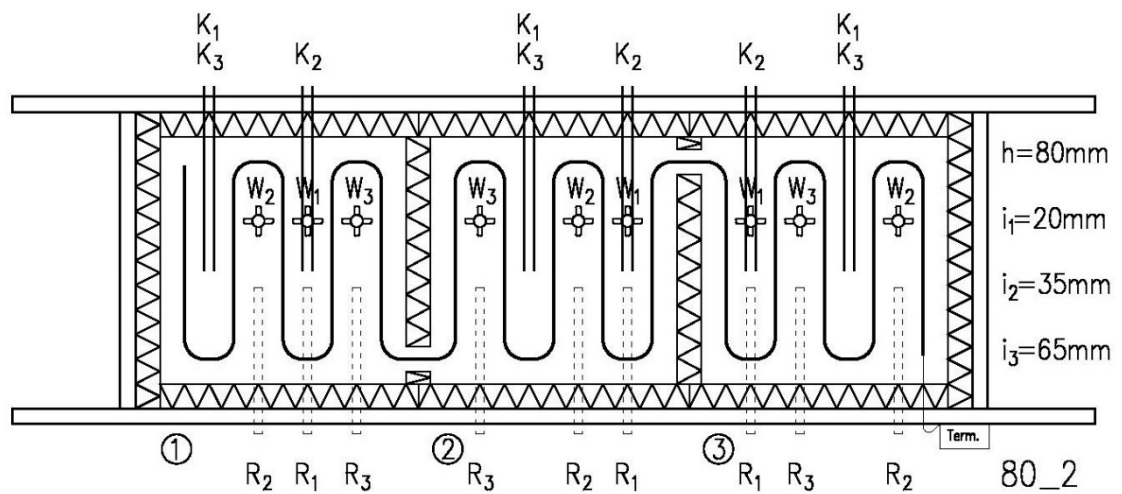
Lämmitys: 7 vrk ilman lämmitystä, sen jälkeen 3 vrk 25 °C, loppuaika 50 °C jatkuva

Rotronic HC2-S antureita: 6 kpl

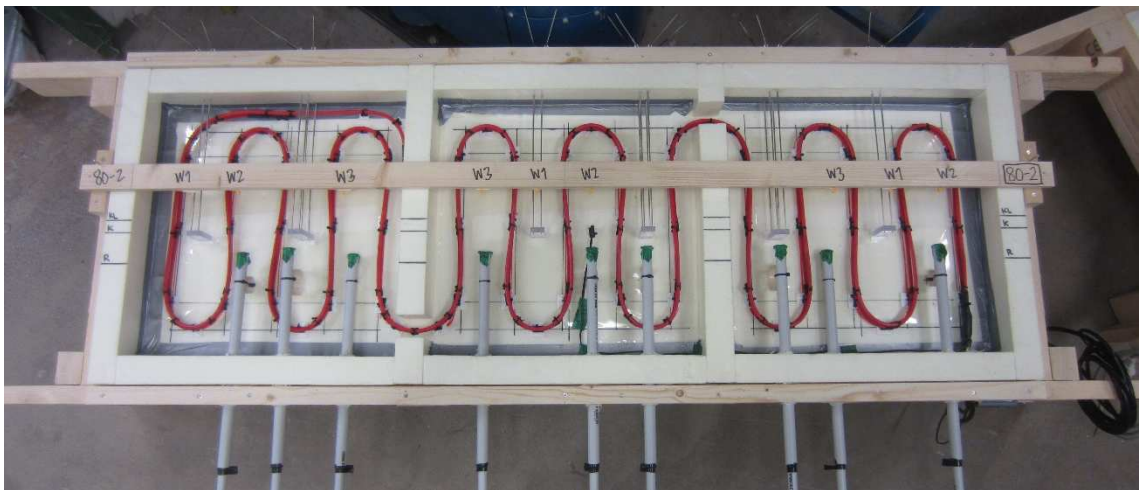
Wiisteen SolidRH SH1 antureita: 6kpl

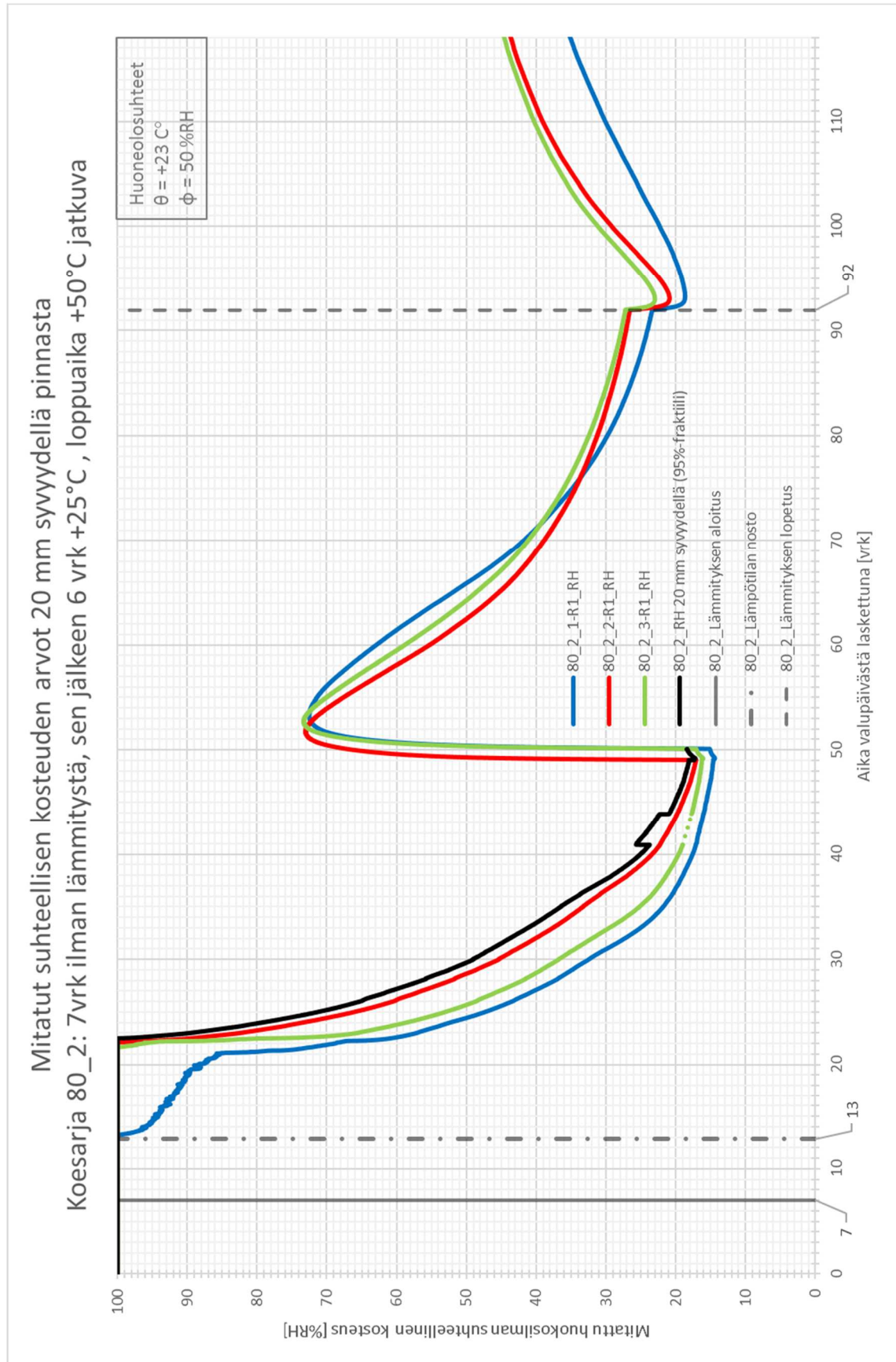
Kapasitanssineulapareja: 6 kpl

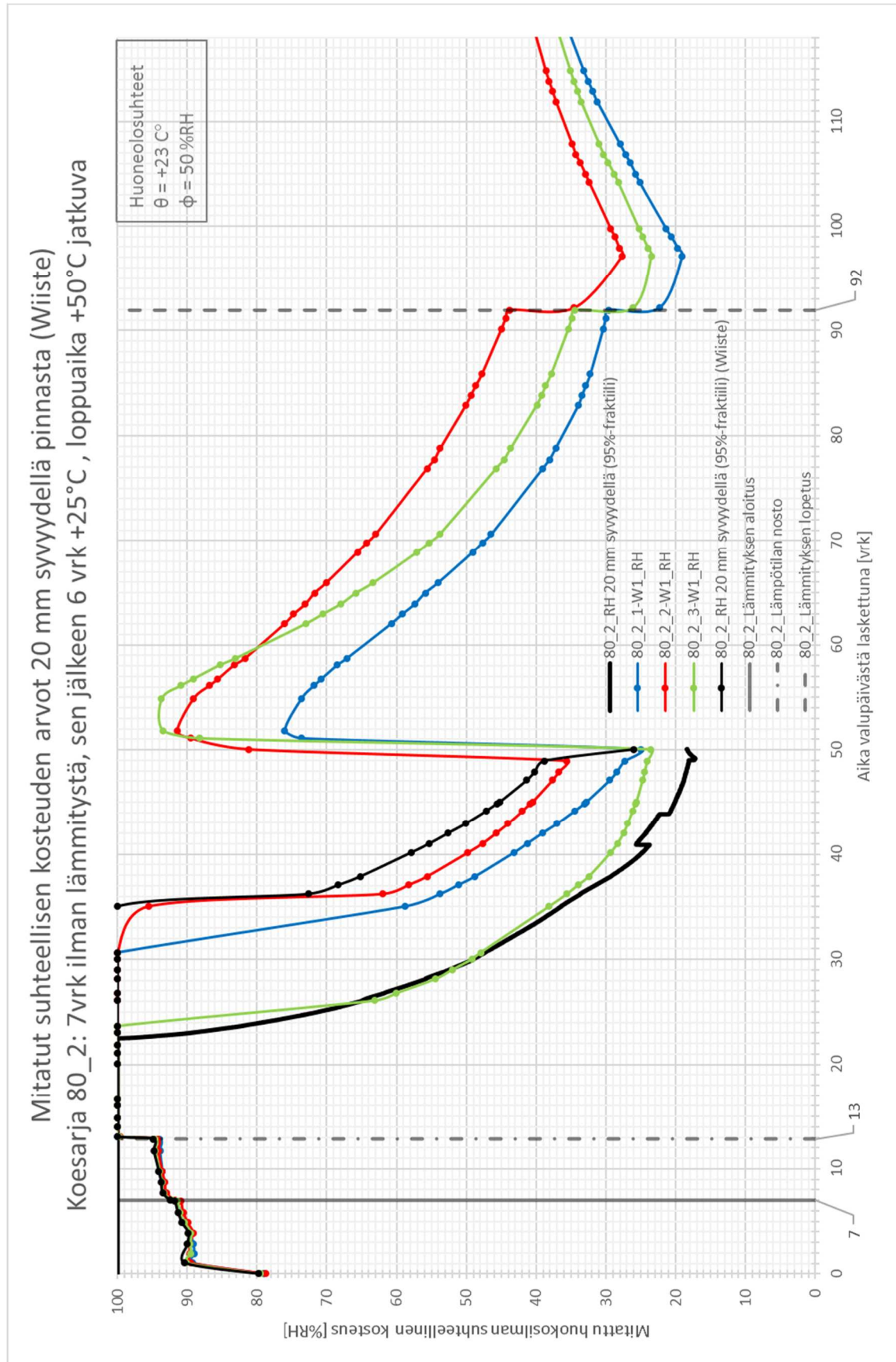
Poikkeamat suunnitelmasta: 7 vrk ilman lämmitystä, sen jälkeen **6 vrk** 25 °C, loppuaika 50 °C jatkuva

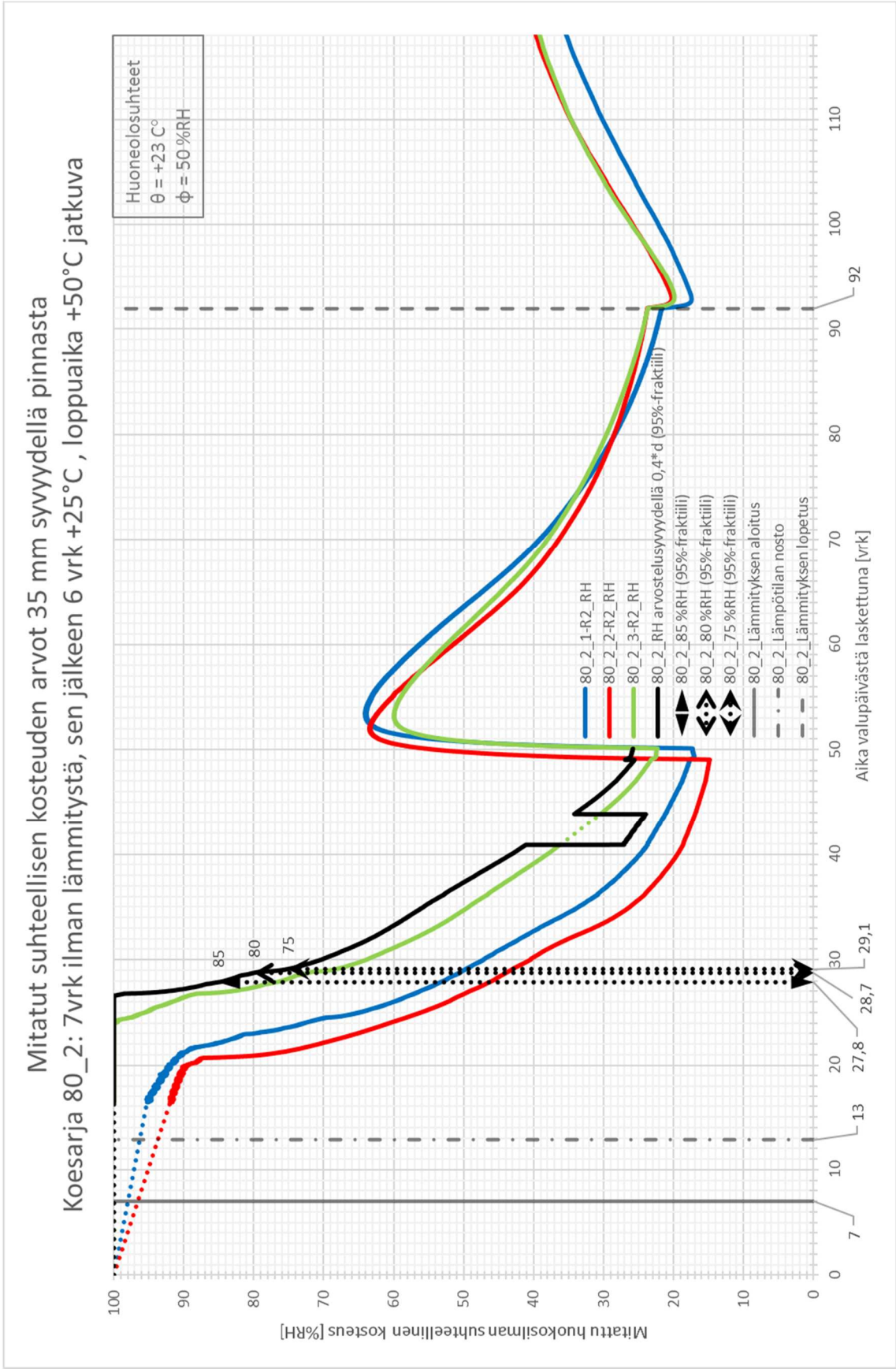


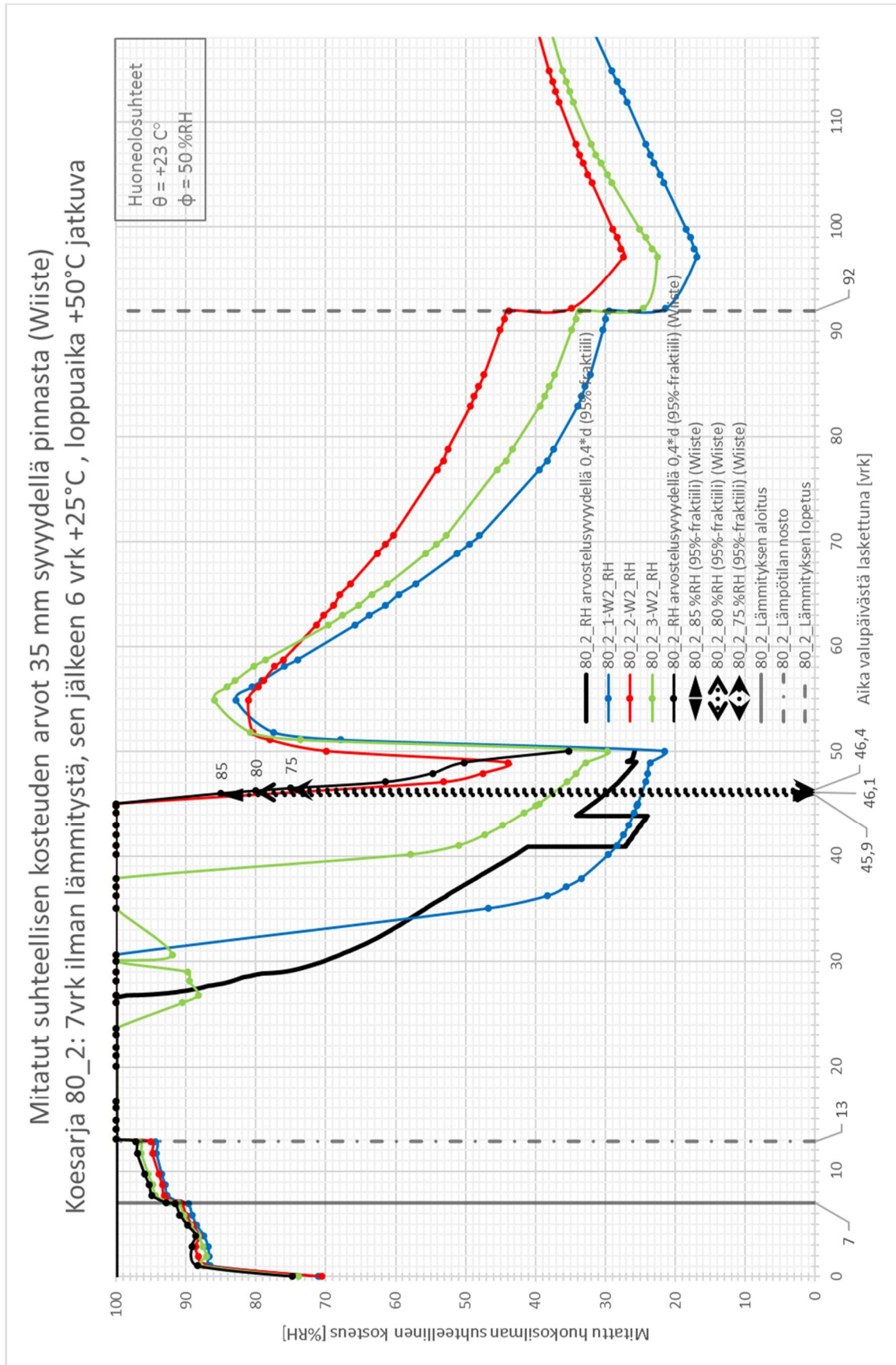
Toteutus

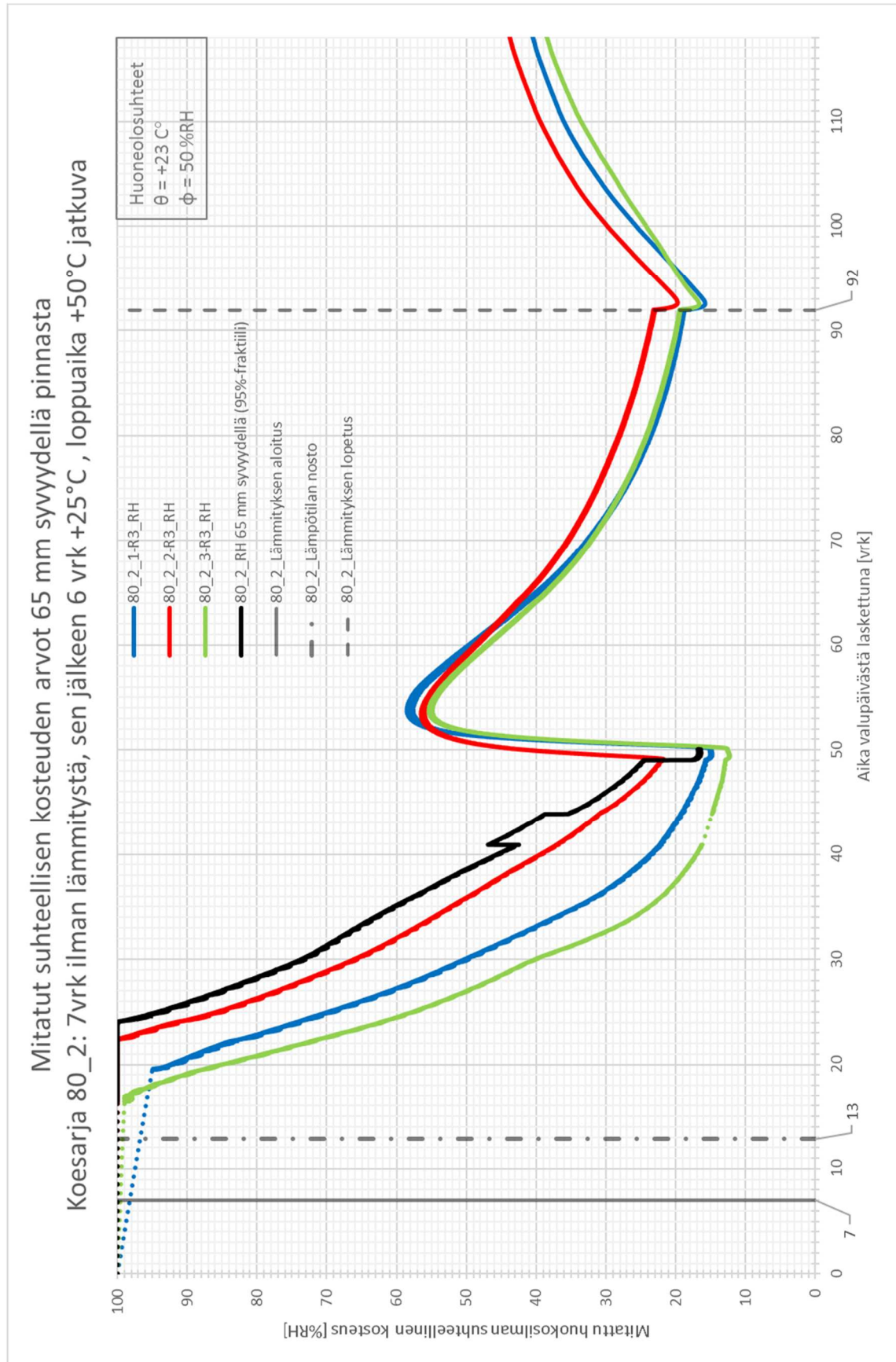


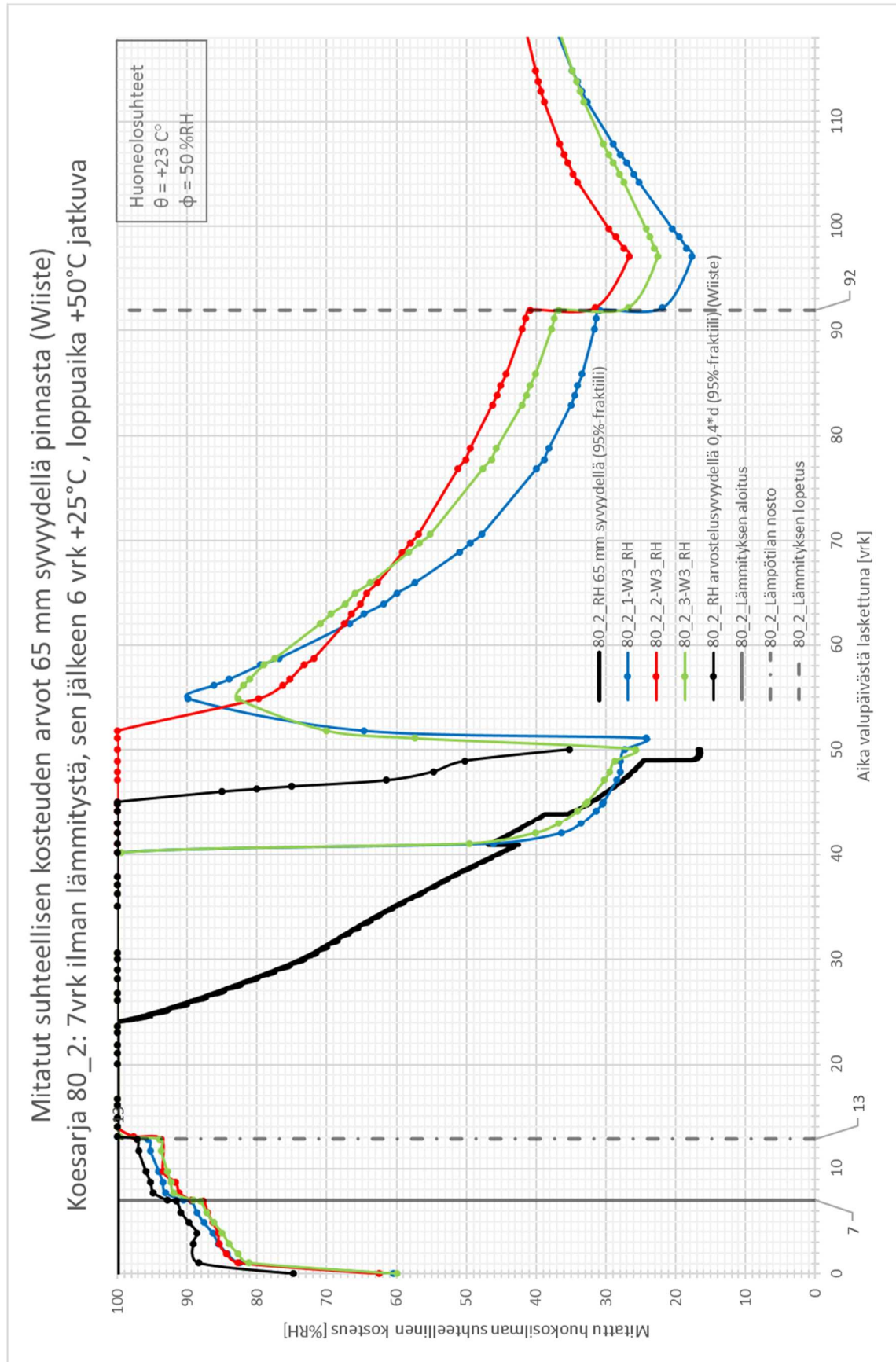


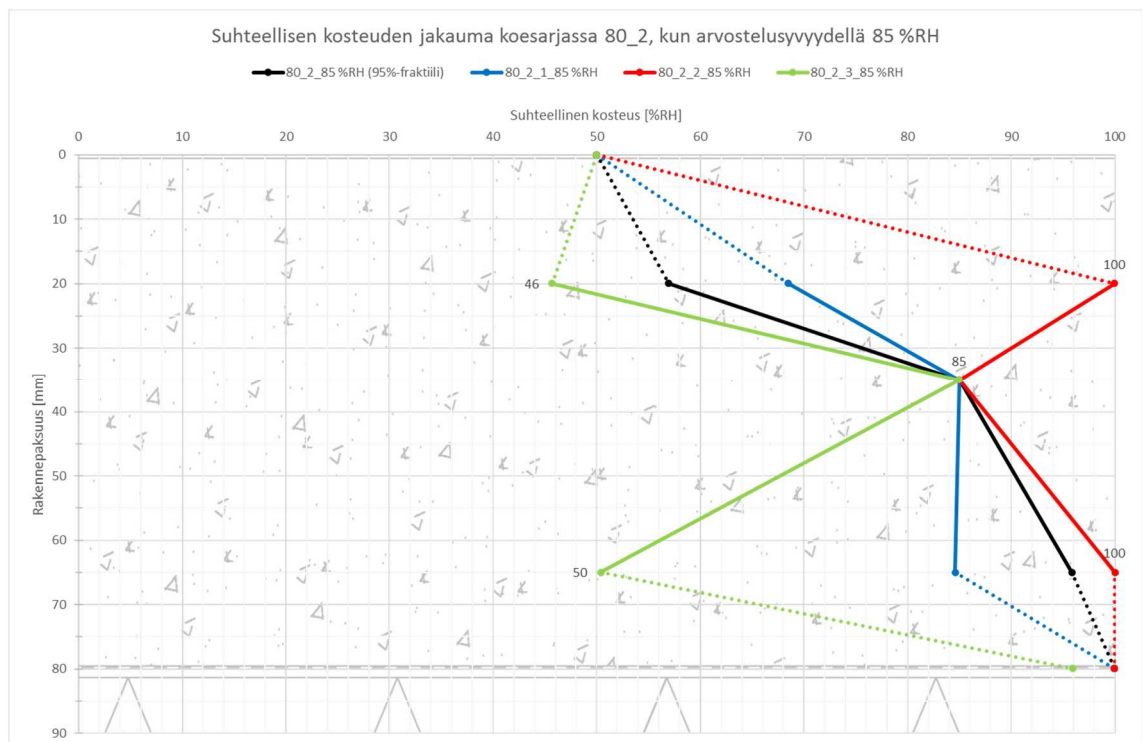
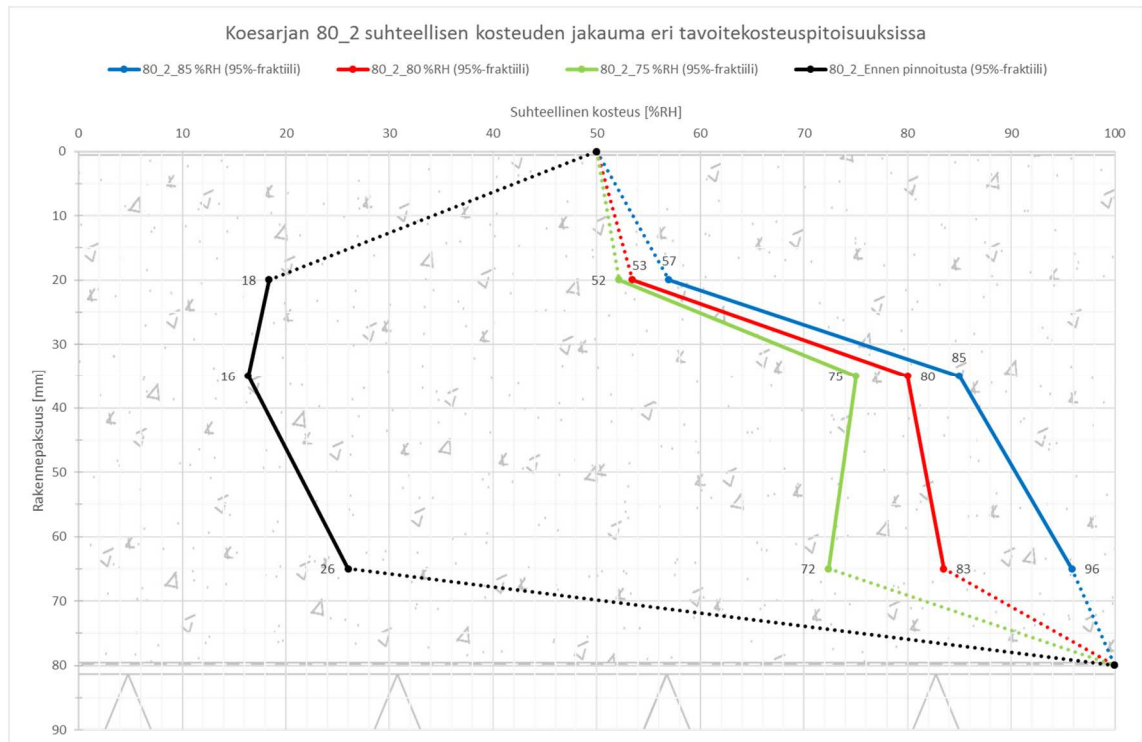


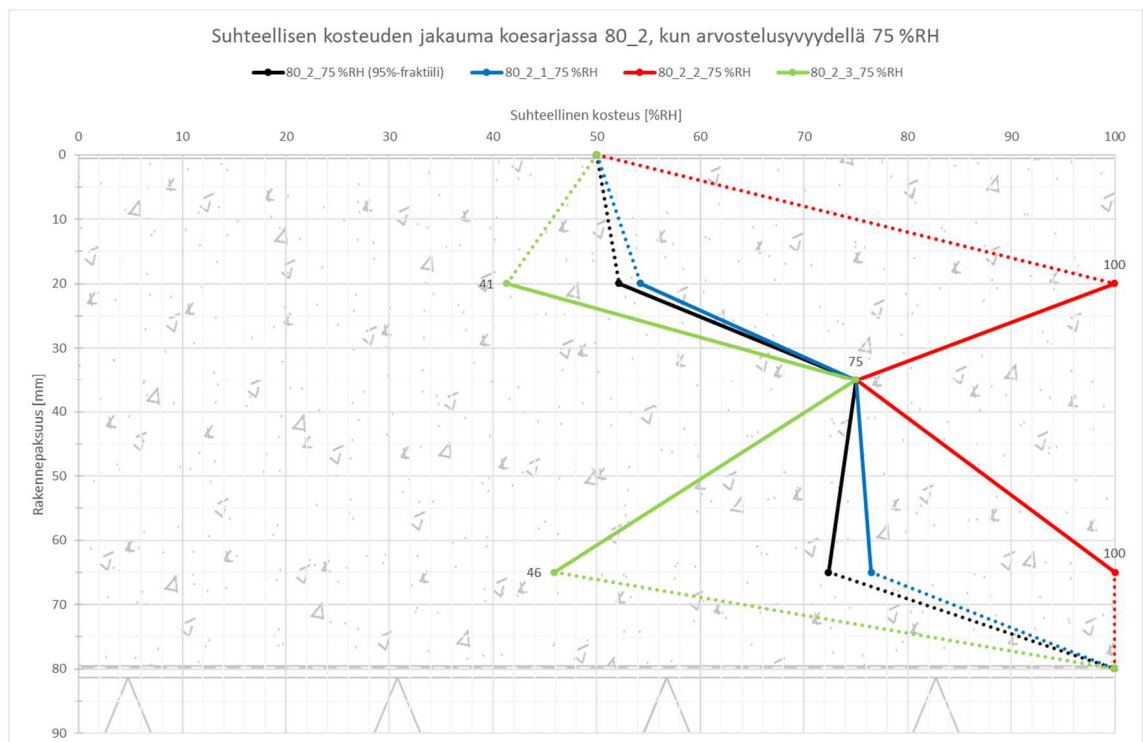
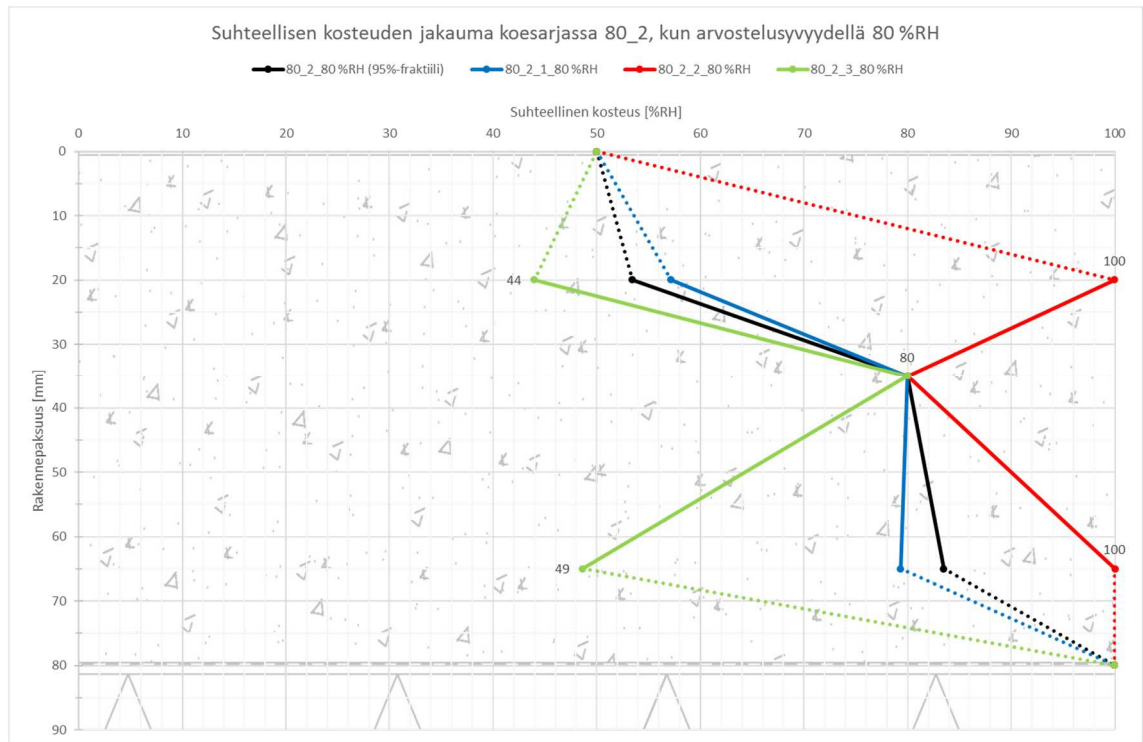


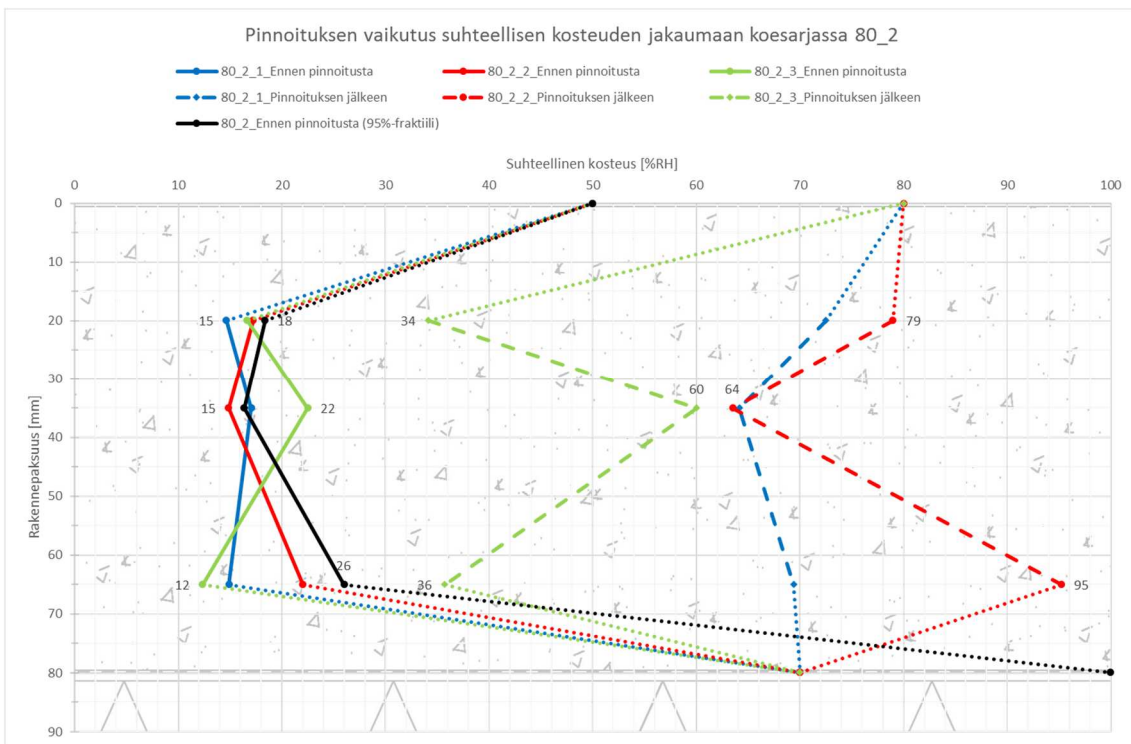












KOESARJA 80_3

Suunnitelma

Valun paksuus: 80 mm

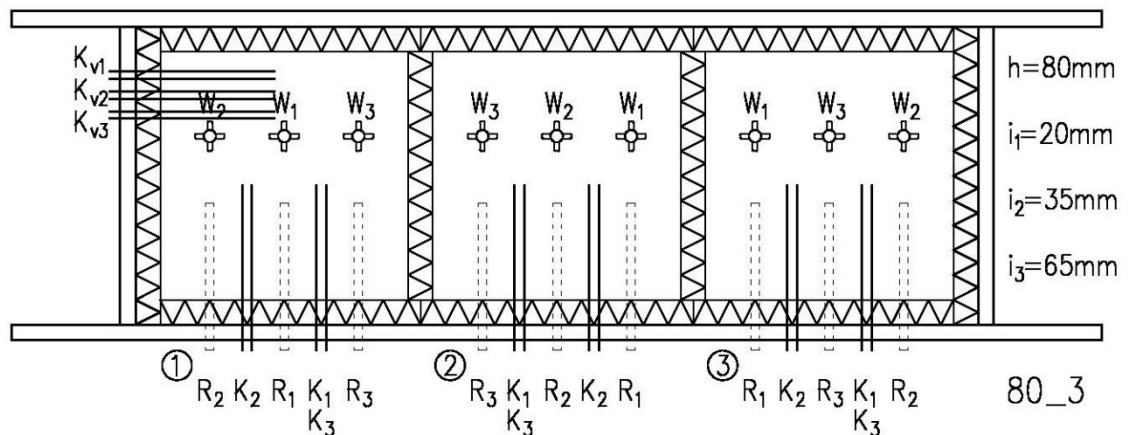
Lämmitys: Ei lämmitystä

Rotronic HC2-S antureita: 6 kpl

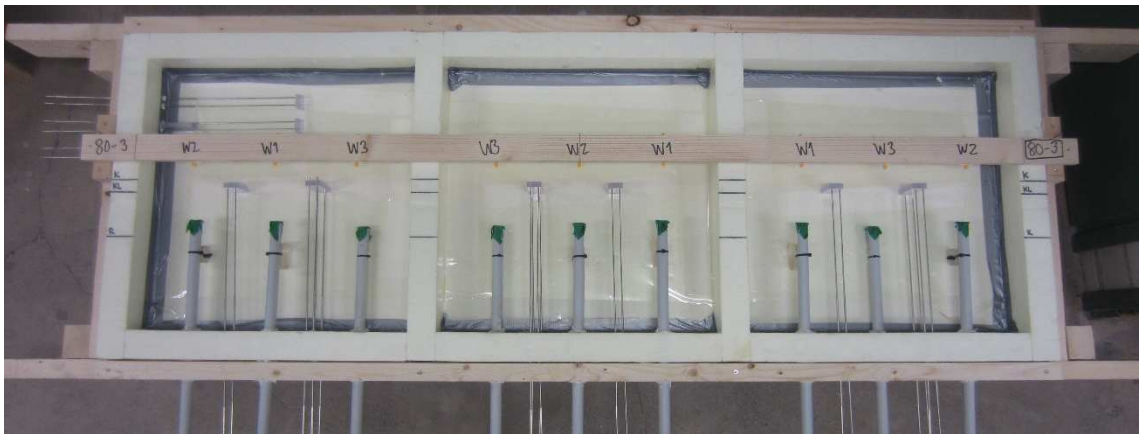
Wiisteen SolidRH SH1 antureita: 6kpl

Kapasitanssineulapareja: 6 kpl

Poikkeamat suunnitelmasta: Ei poikkeamia



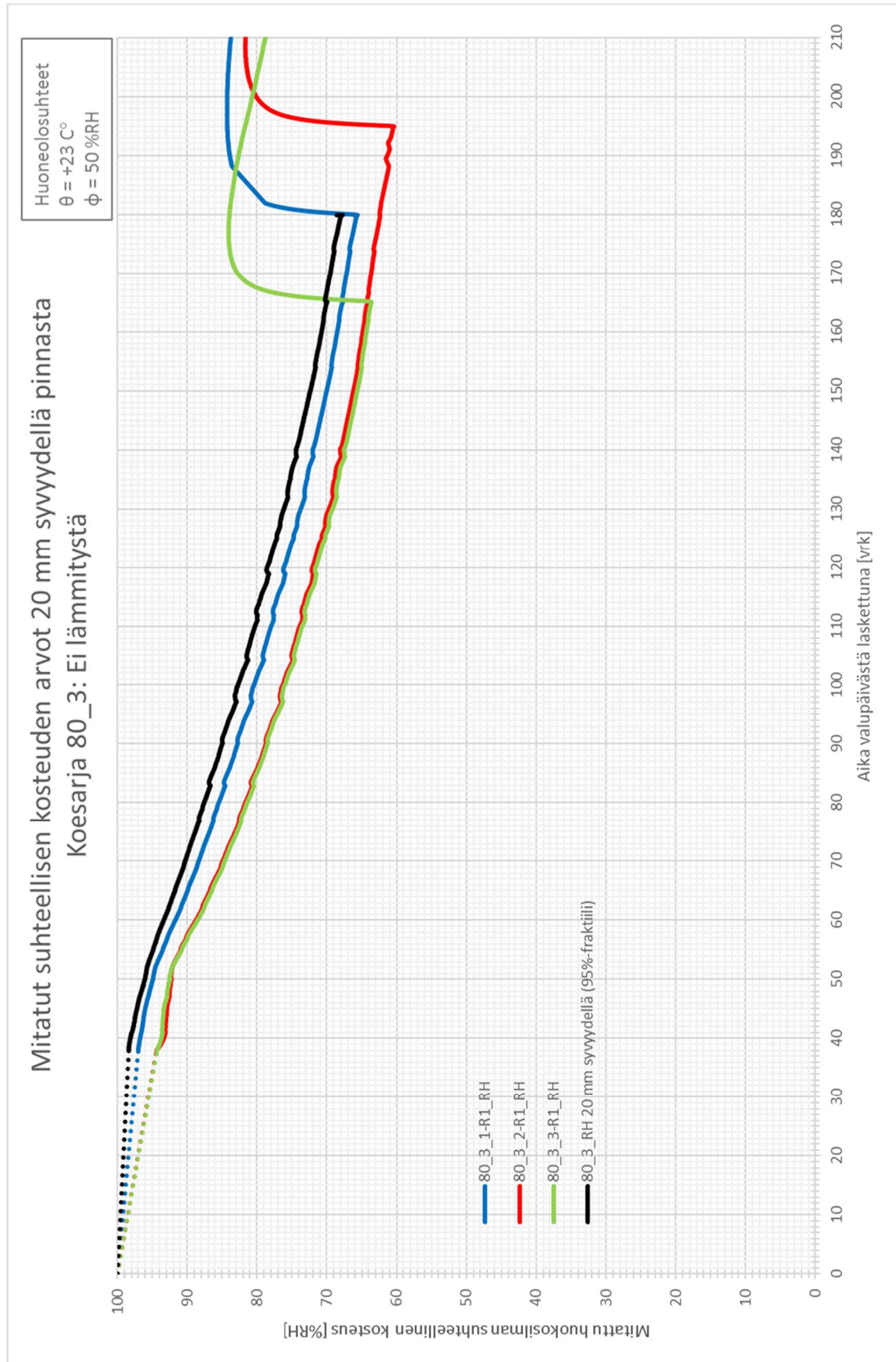
Toteutus

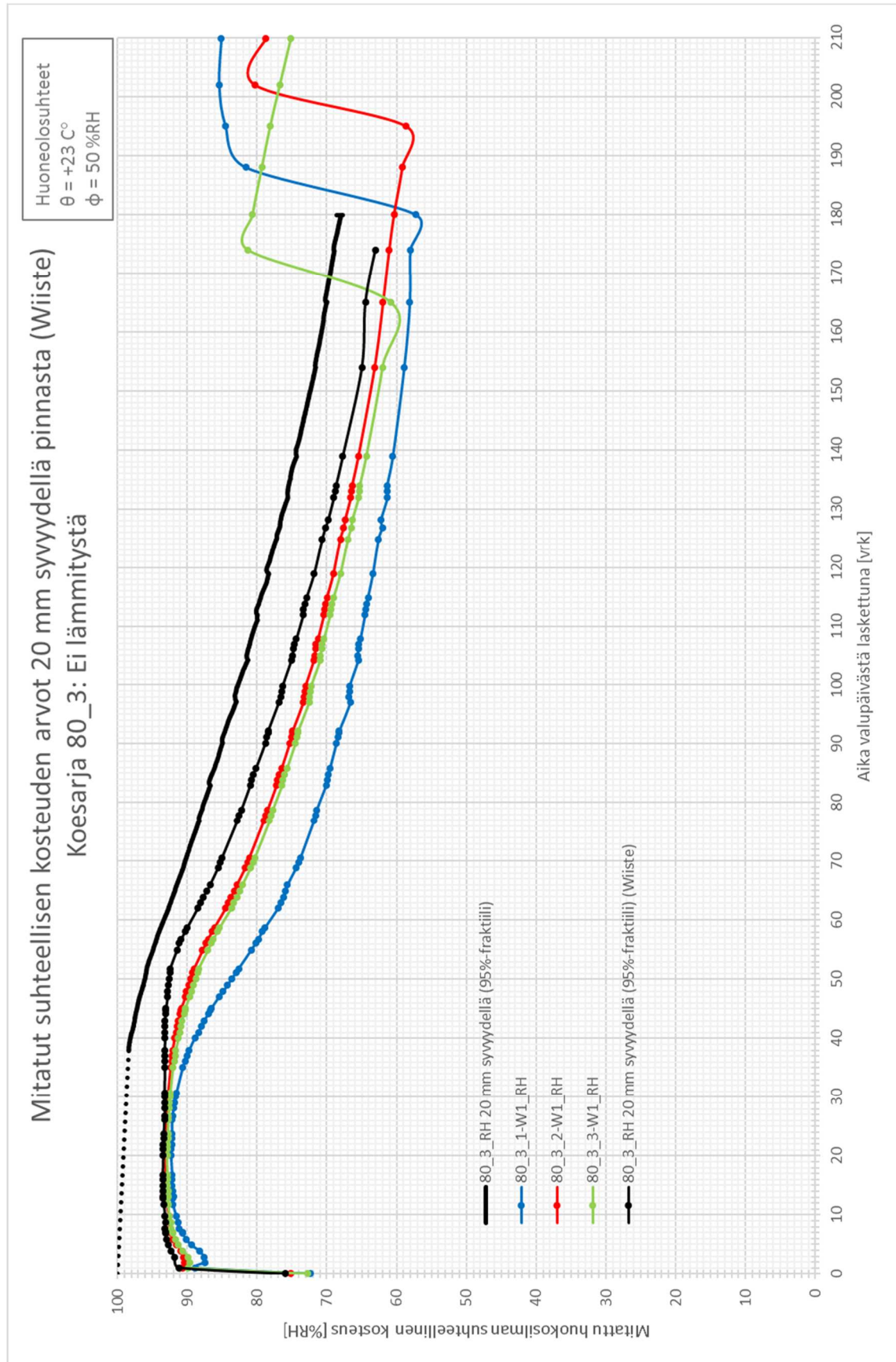


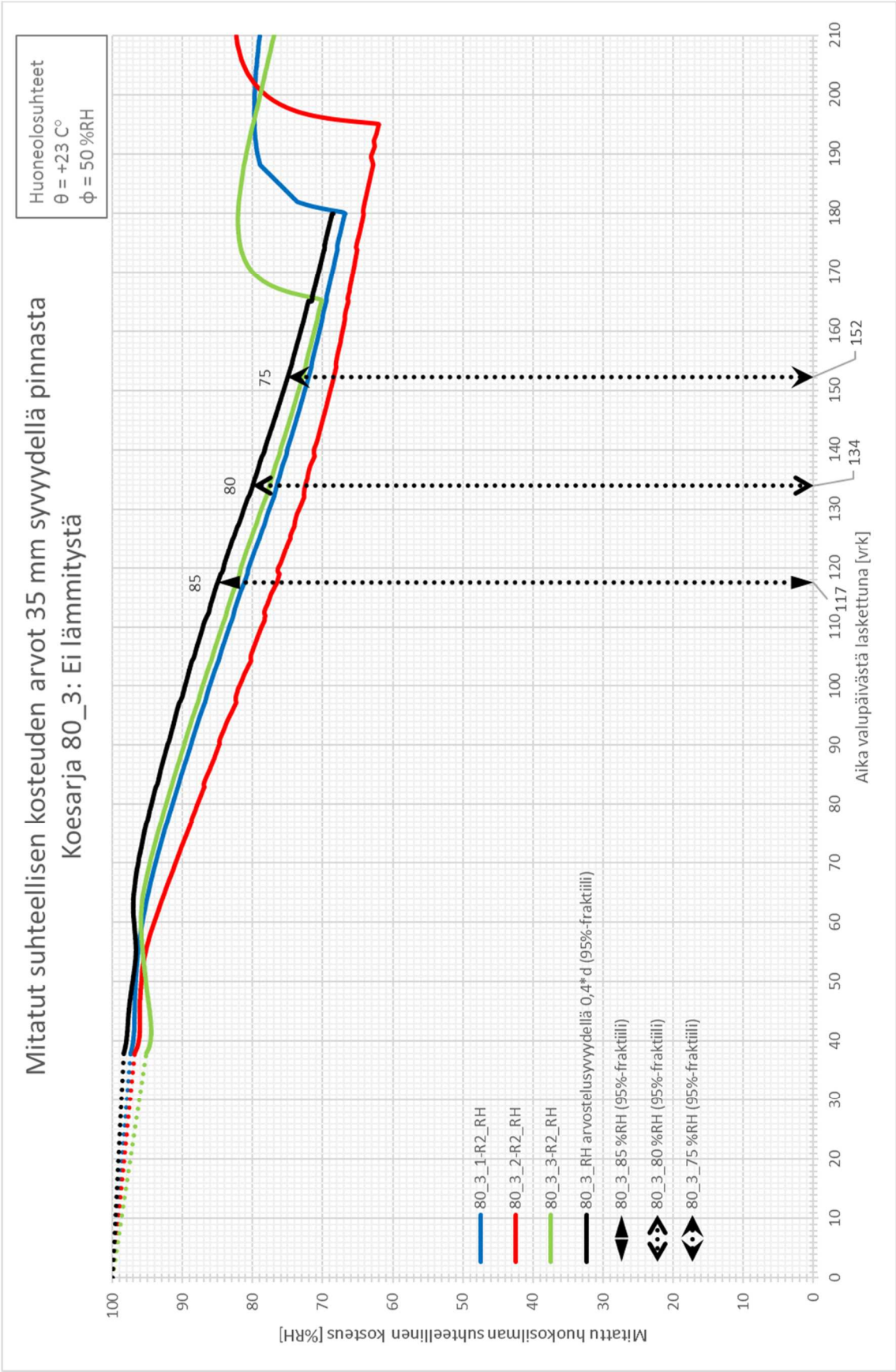
Huomaa vasemmassa päädyssä olevat kapasitanssineulojen vertailusarjat

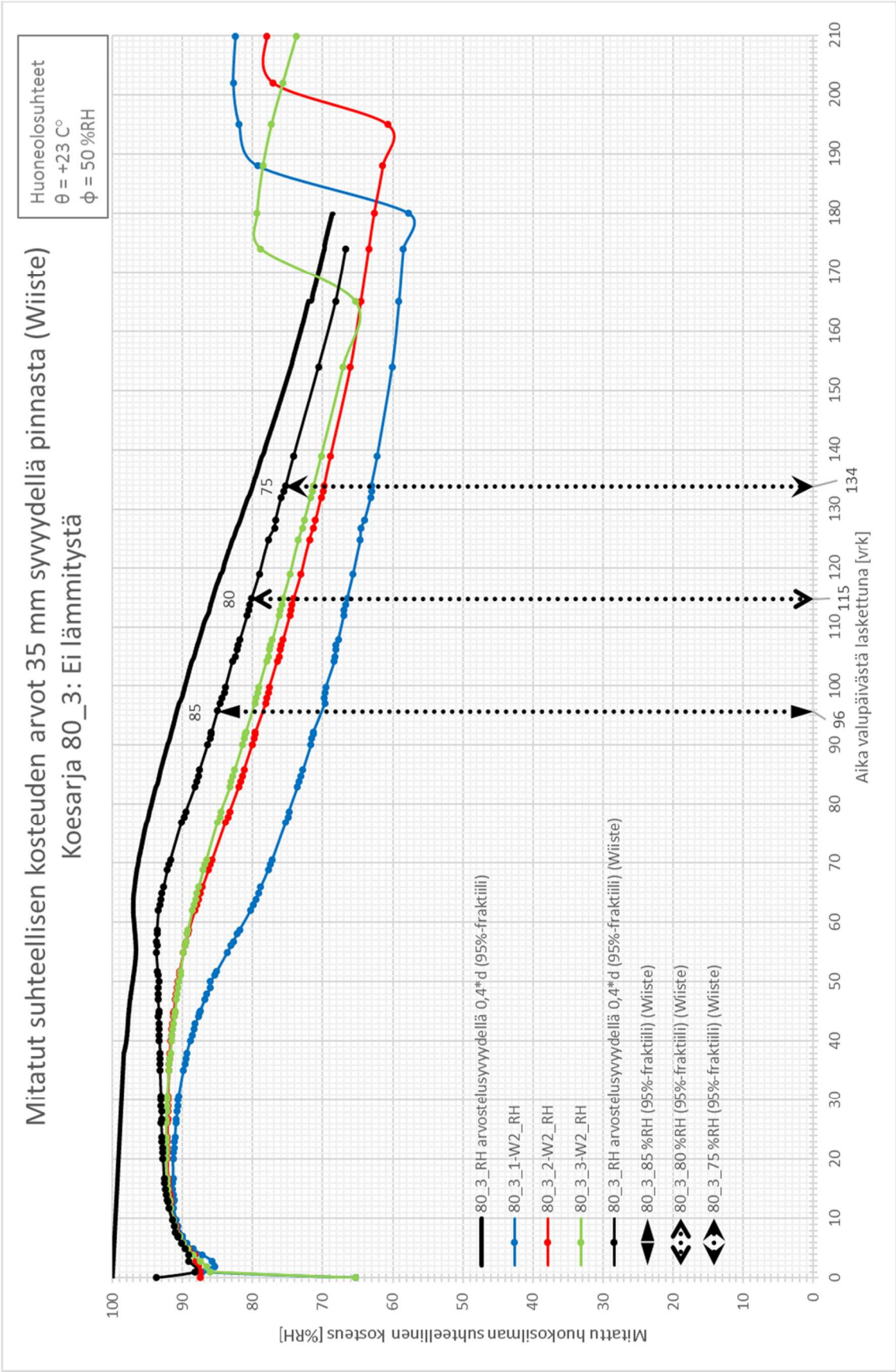


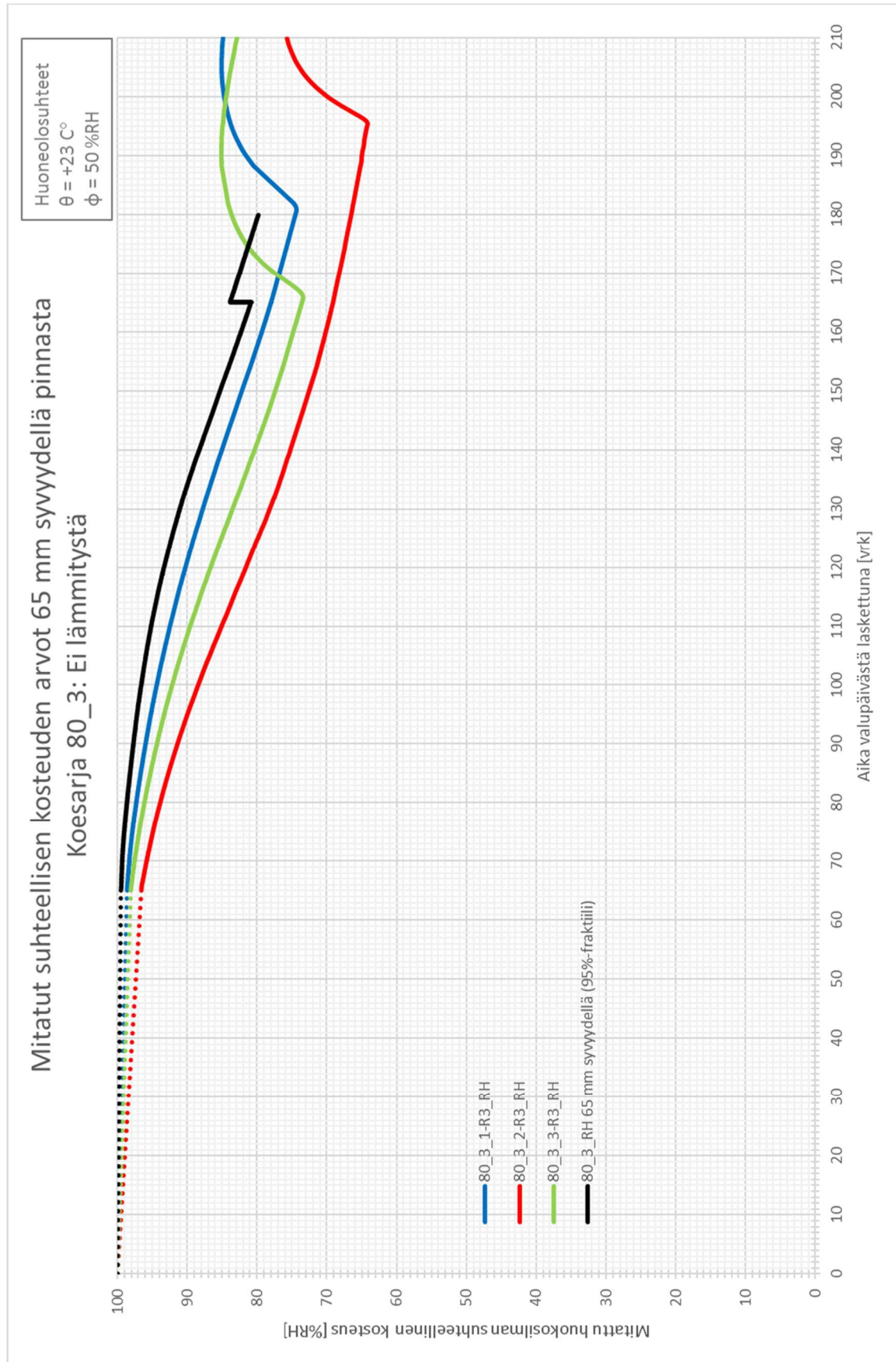
Vertailusarjoissa yksi pari oli kokonaan eristämätön, yksi oli eristetty kutisteletkuilla ja yhdessä oli kutisteletkujen lisäksi neulojen välissä vielä 10 mm paksu akryylilevy.

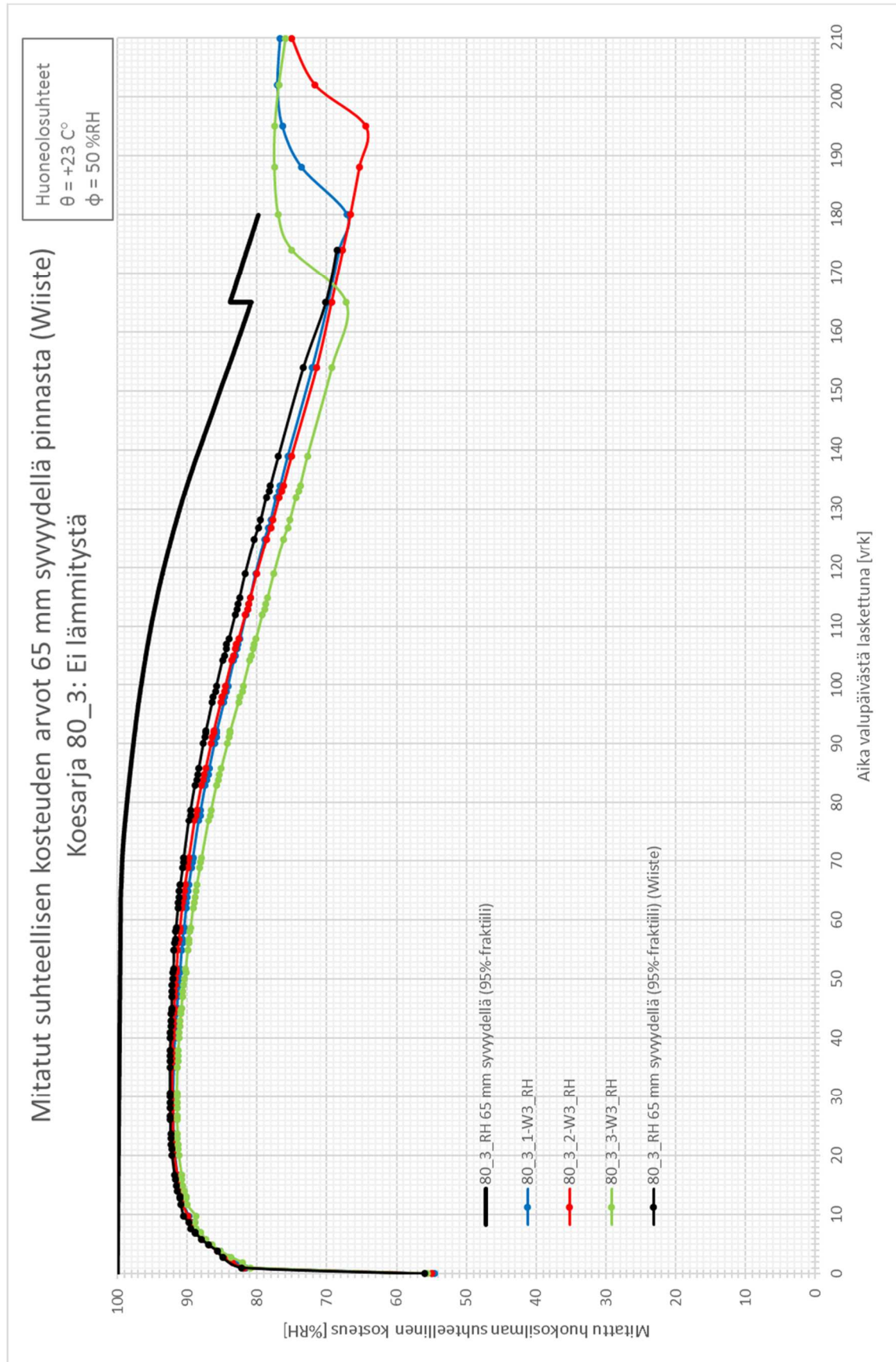


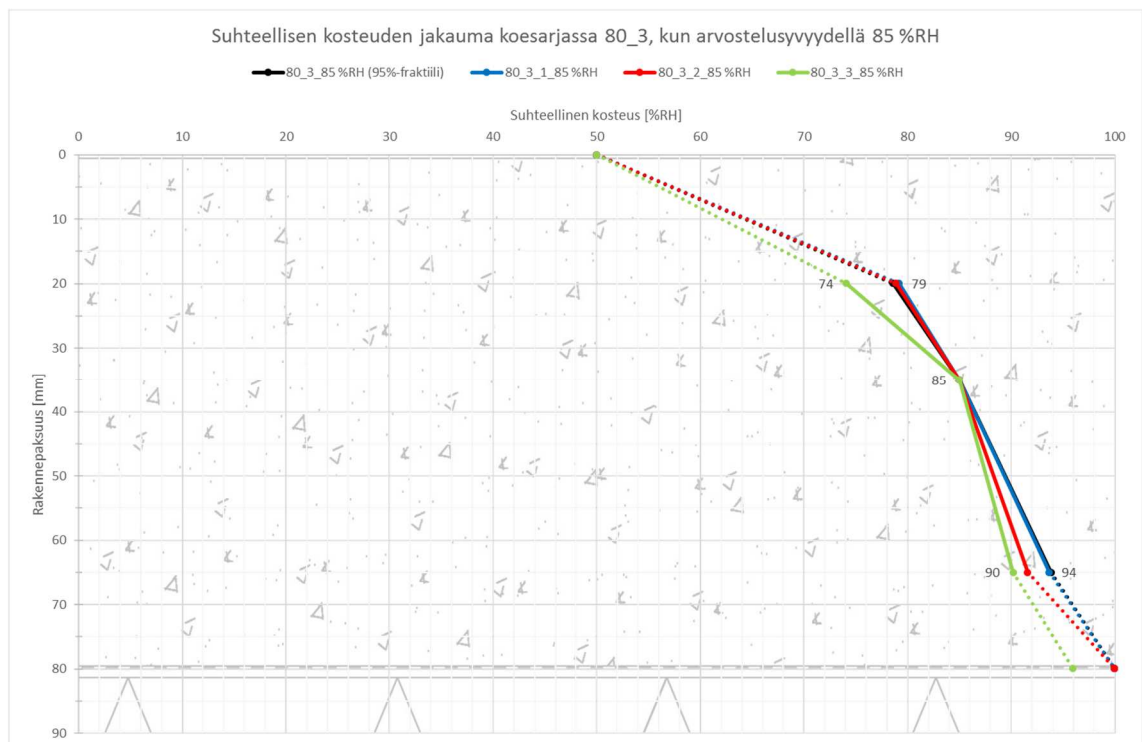
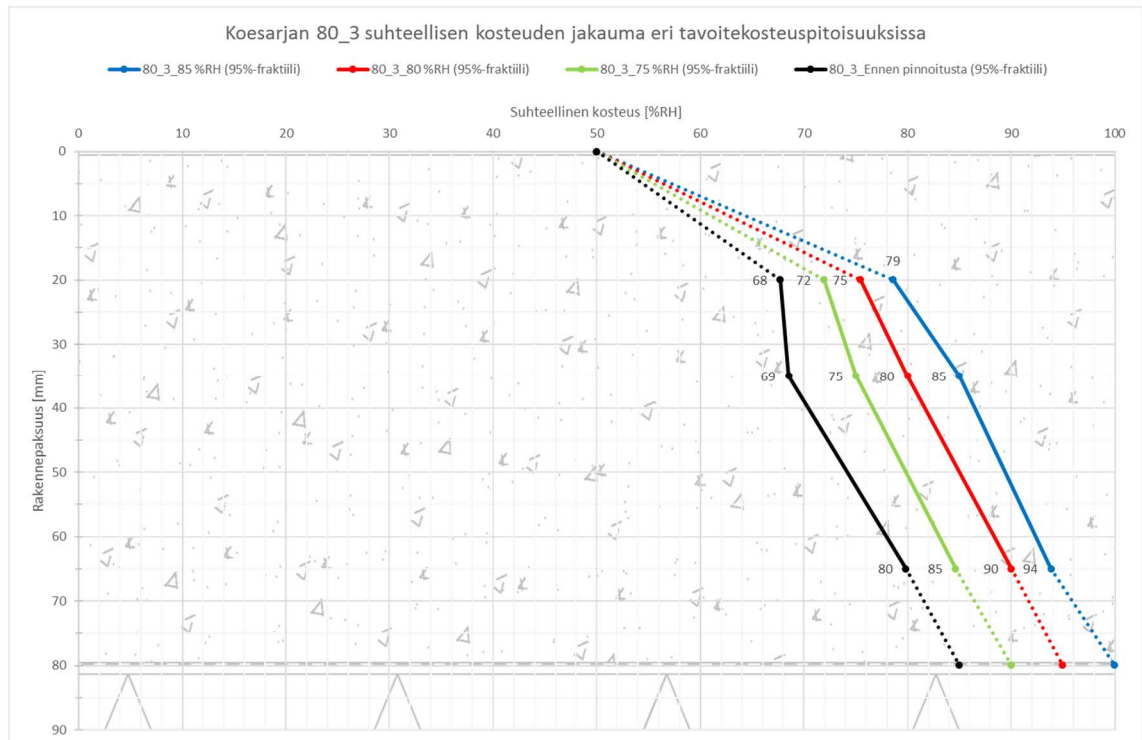


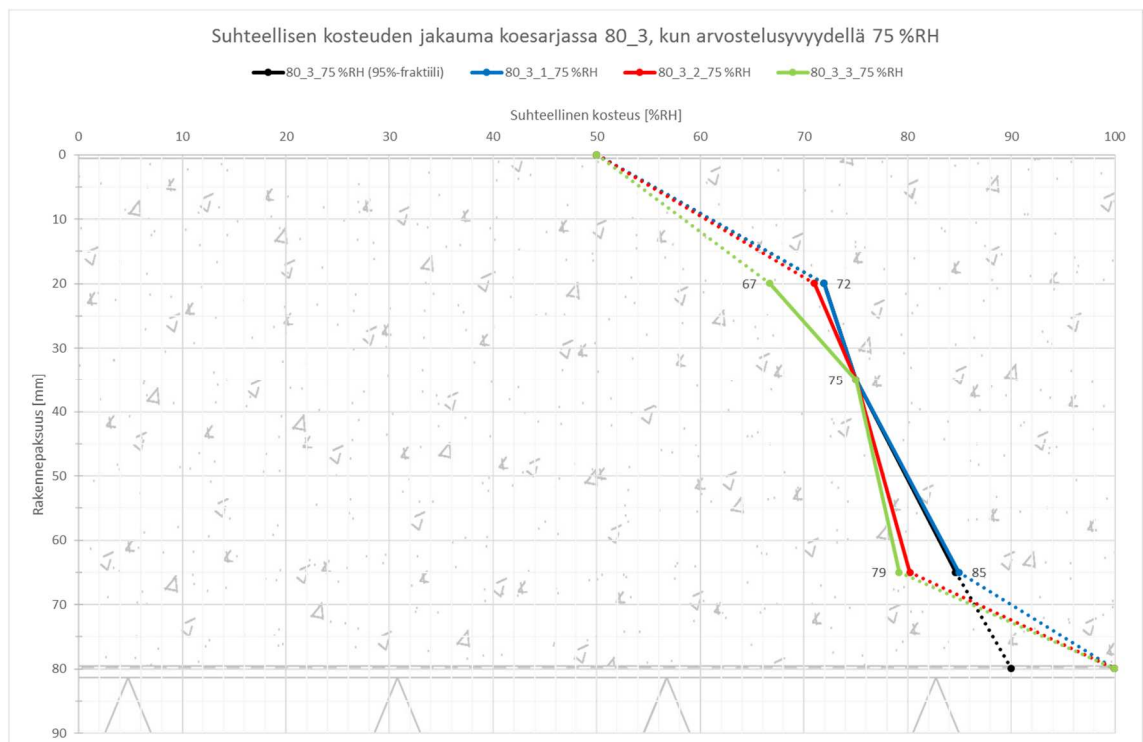
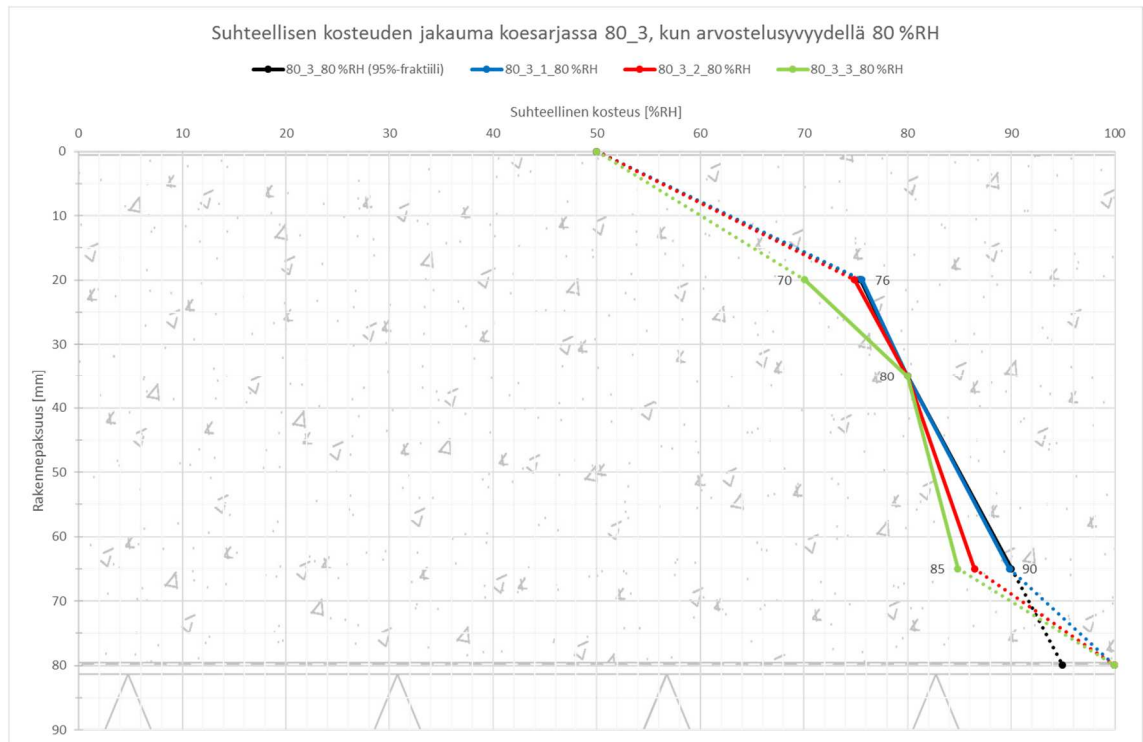


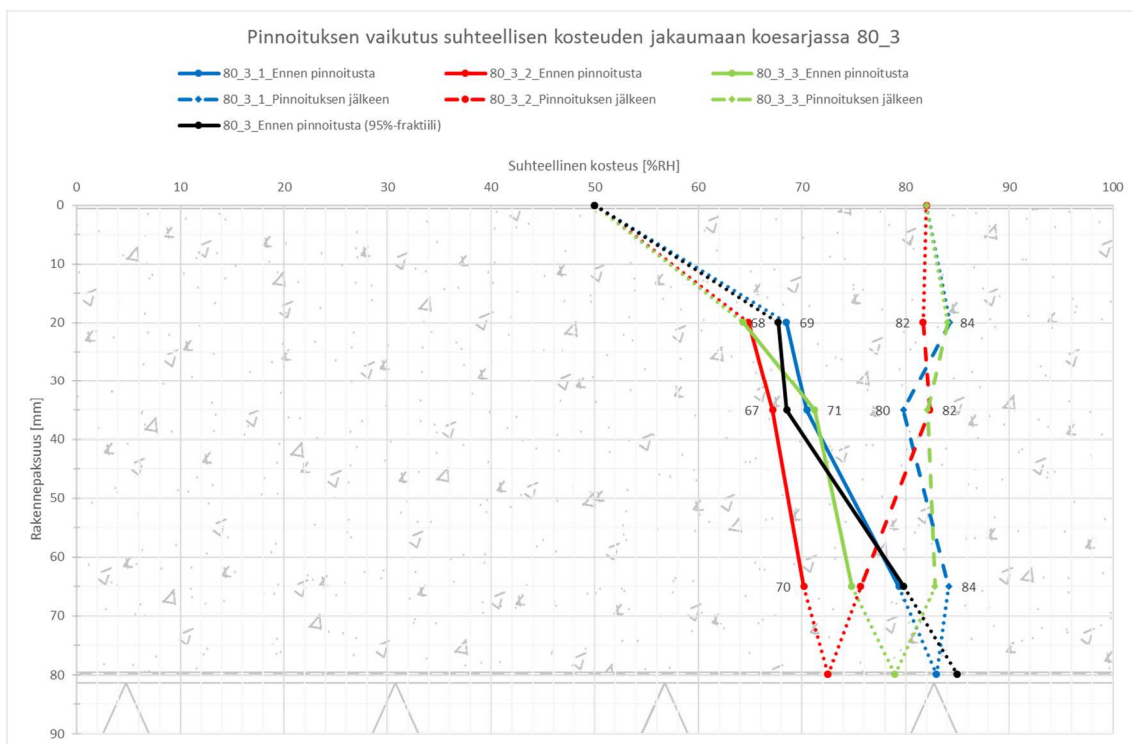




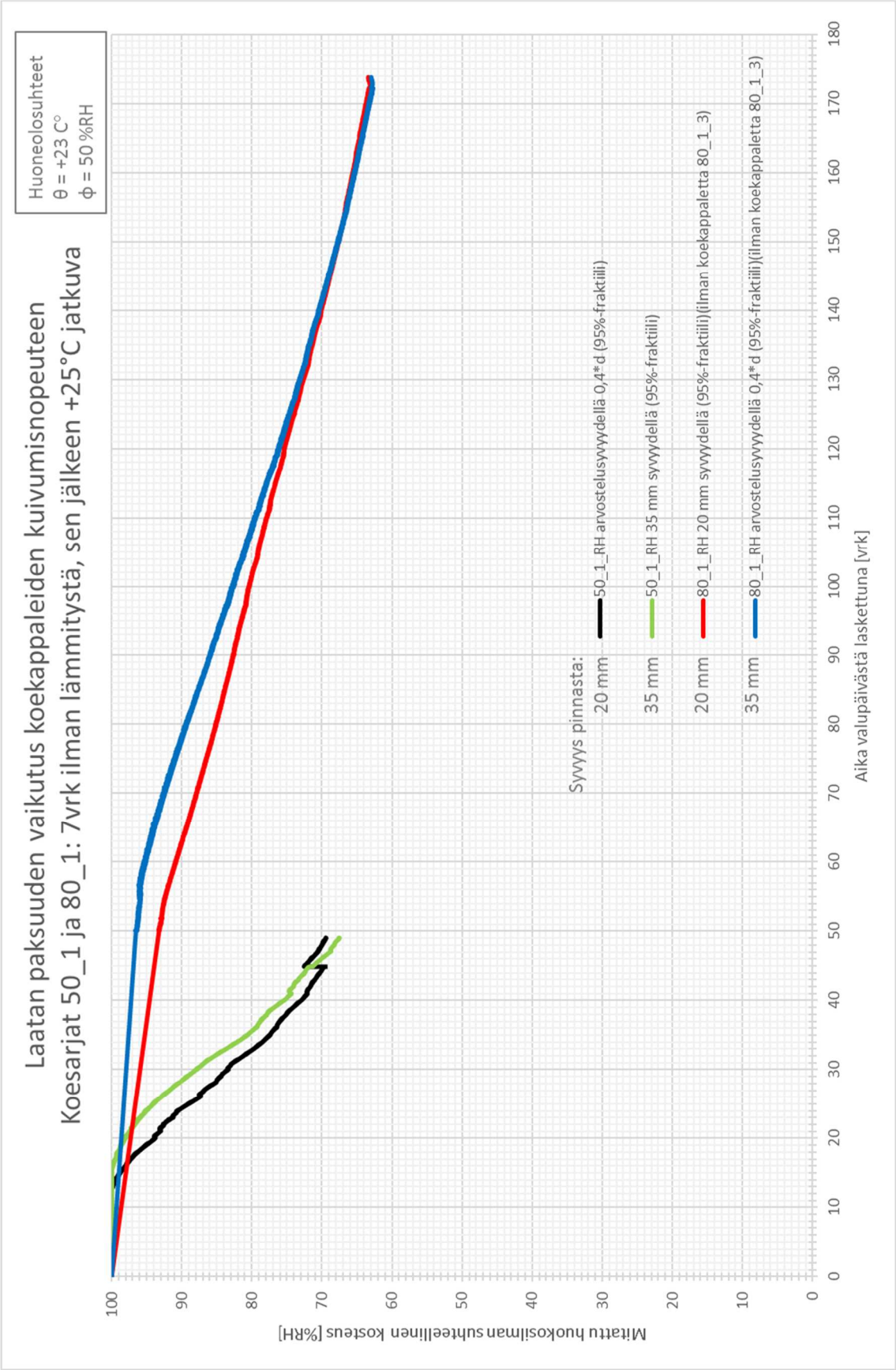


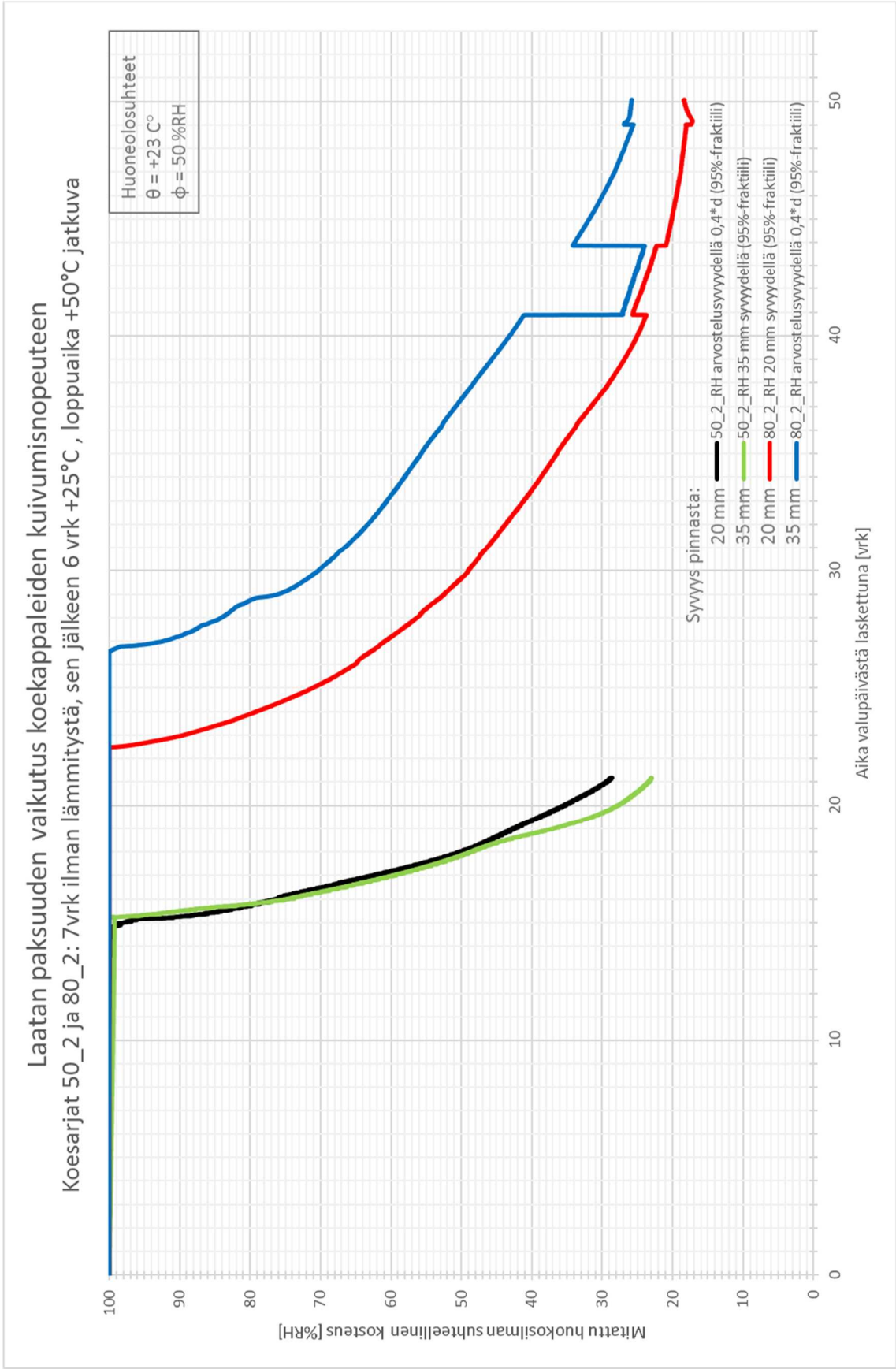


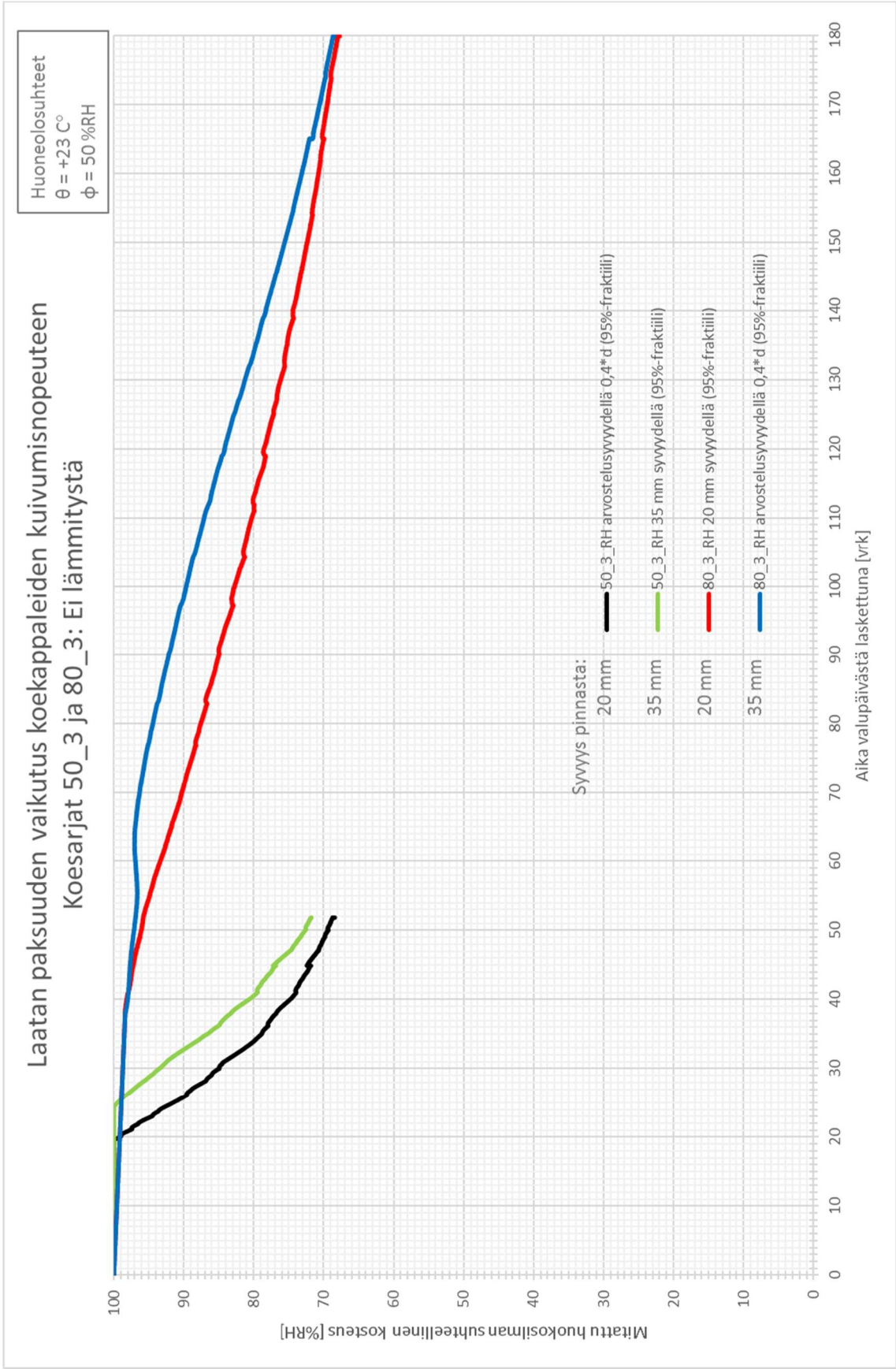




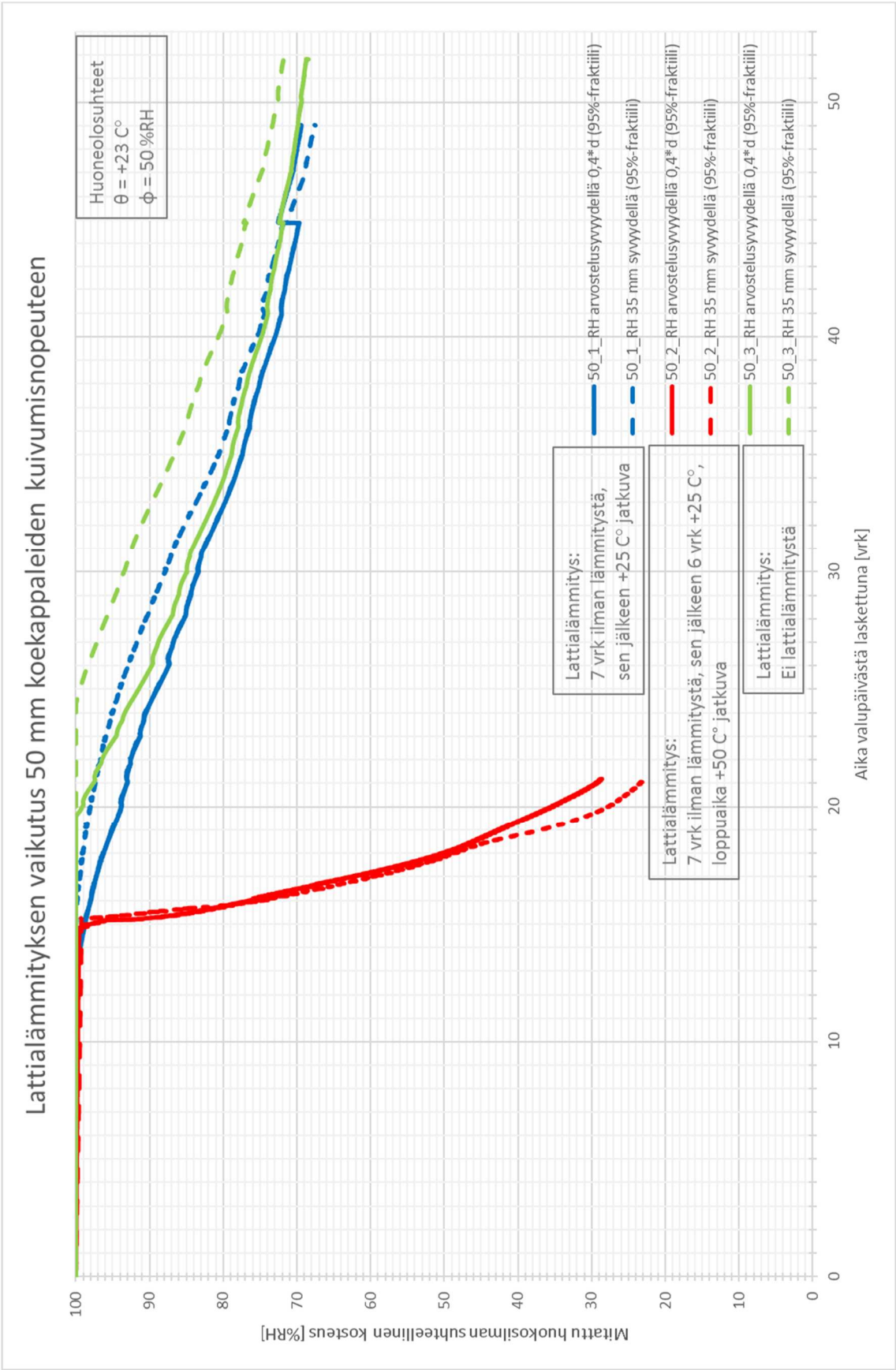
LAATAN PAKSUUDEN VAIKUTUS -VERTAILU

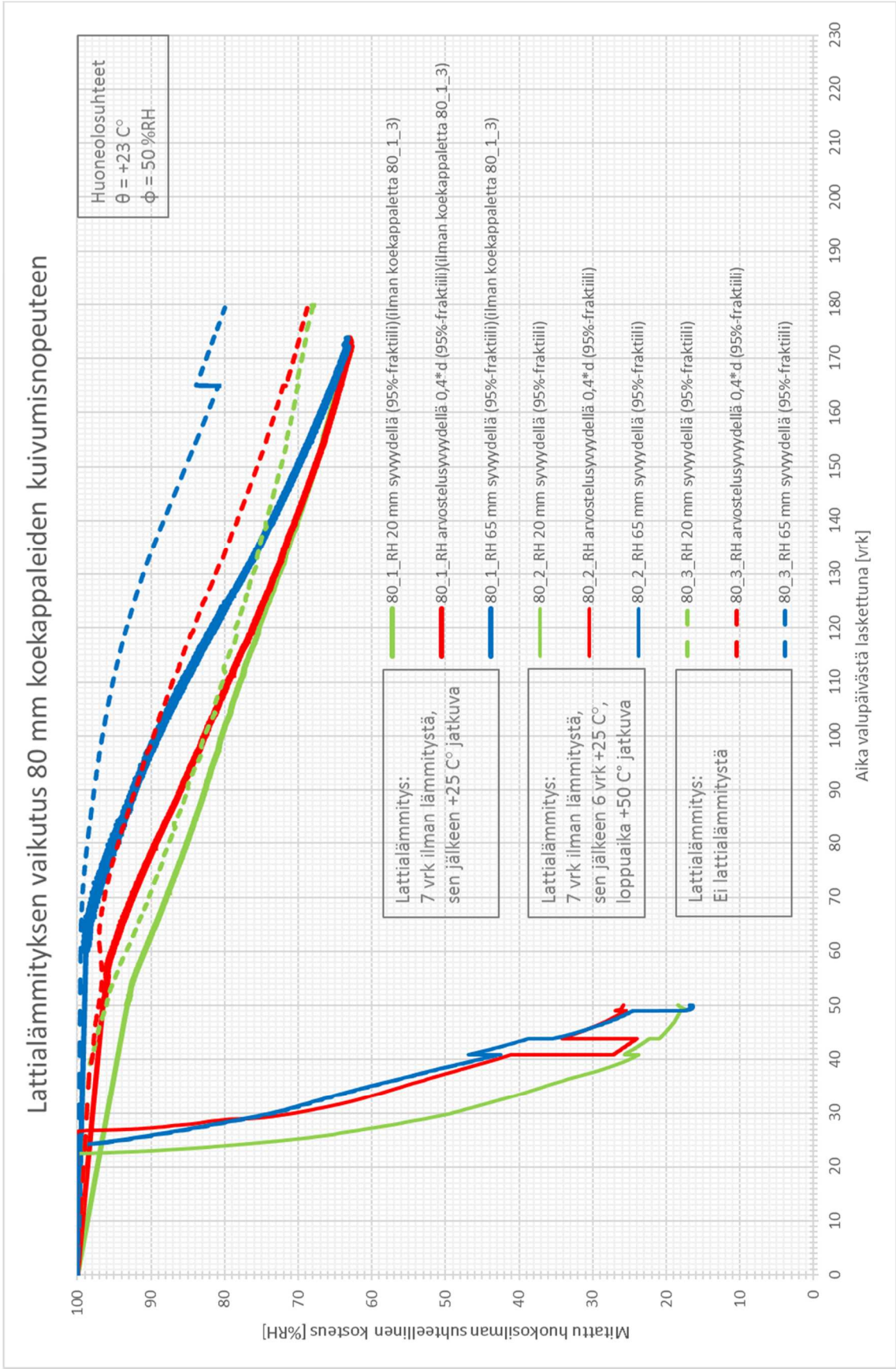




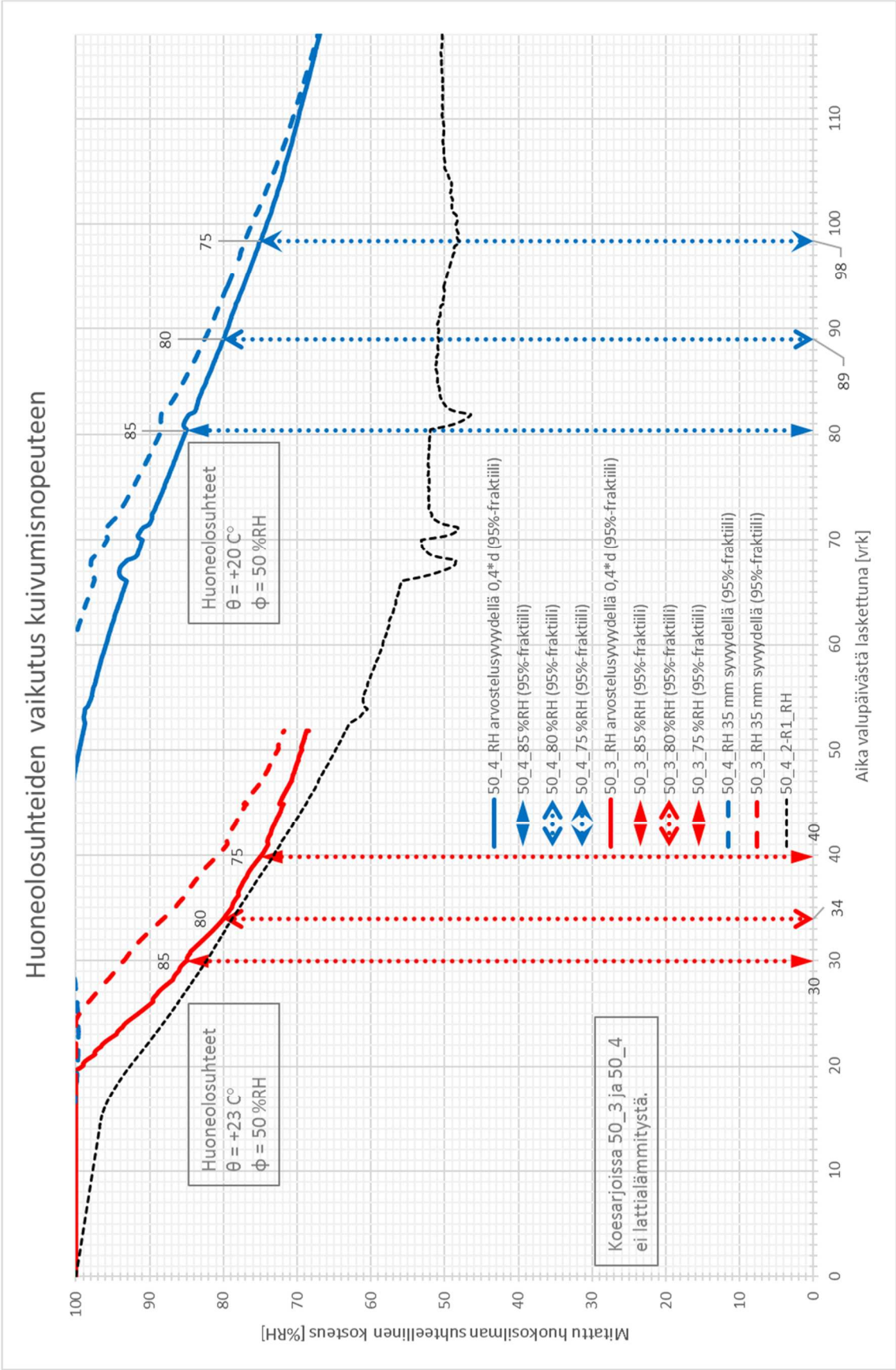


LATTIALÄMMITYKSEN VAIKUTUS -VERTAILU



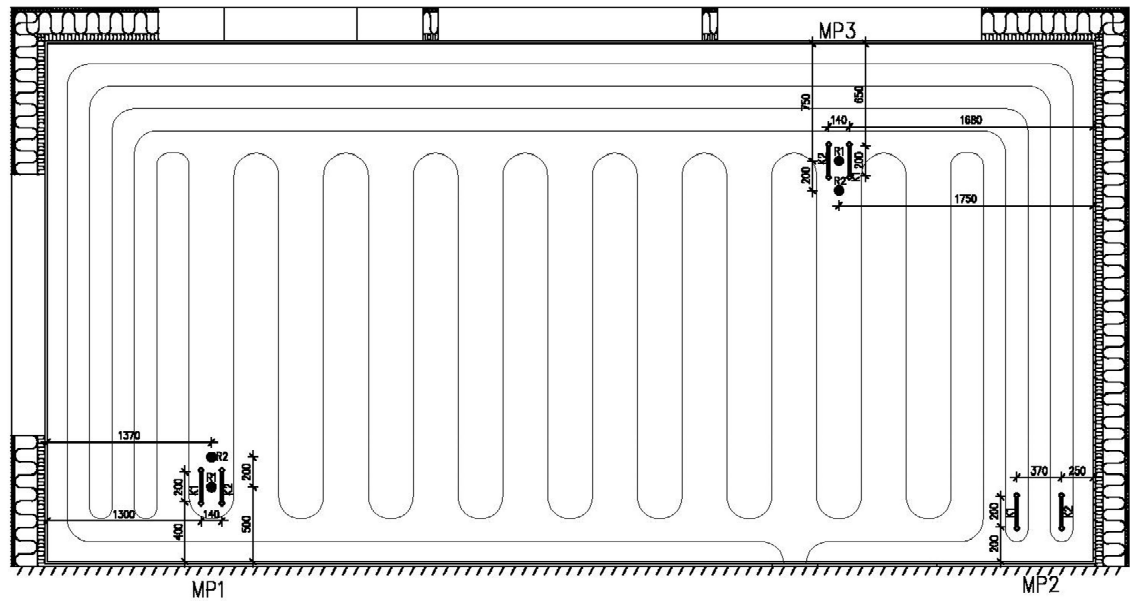


HUONEOLOSUHTEIDEN VAIKUTUS -VERTAILU



LABORATORIOKOKKEIDEN TUTKIMUSTULOKSET

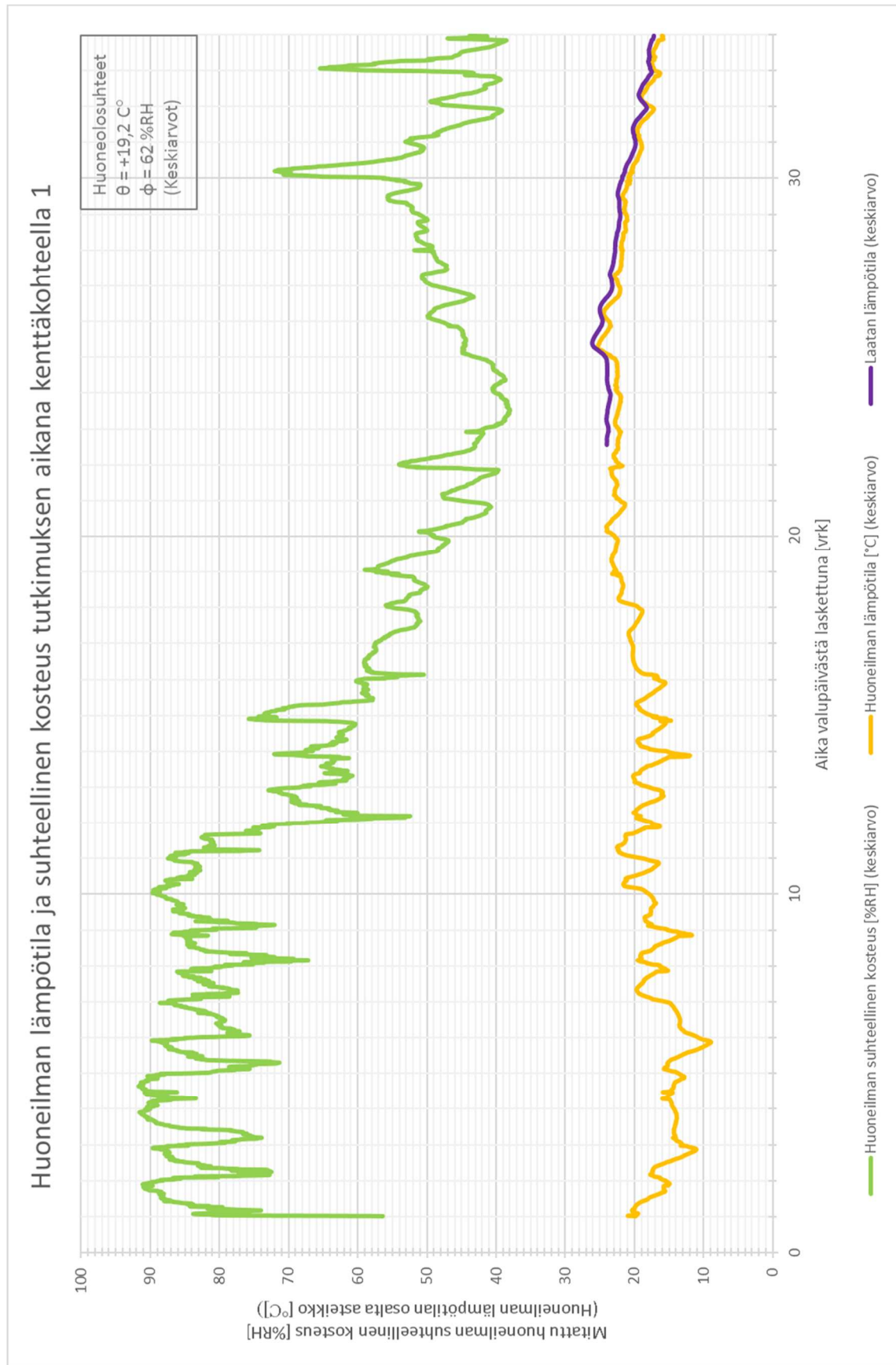
SUUNNITELMA

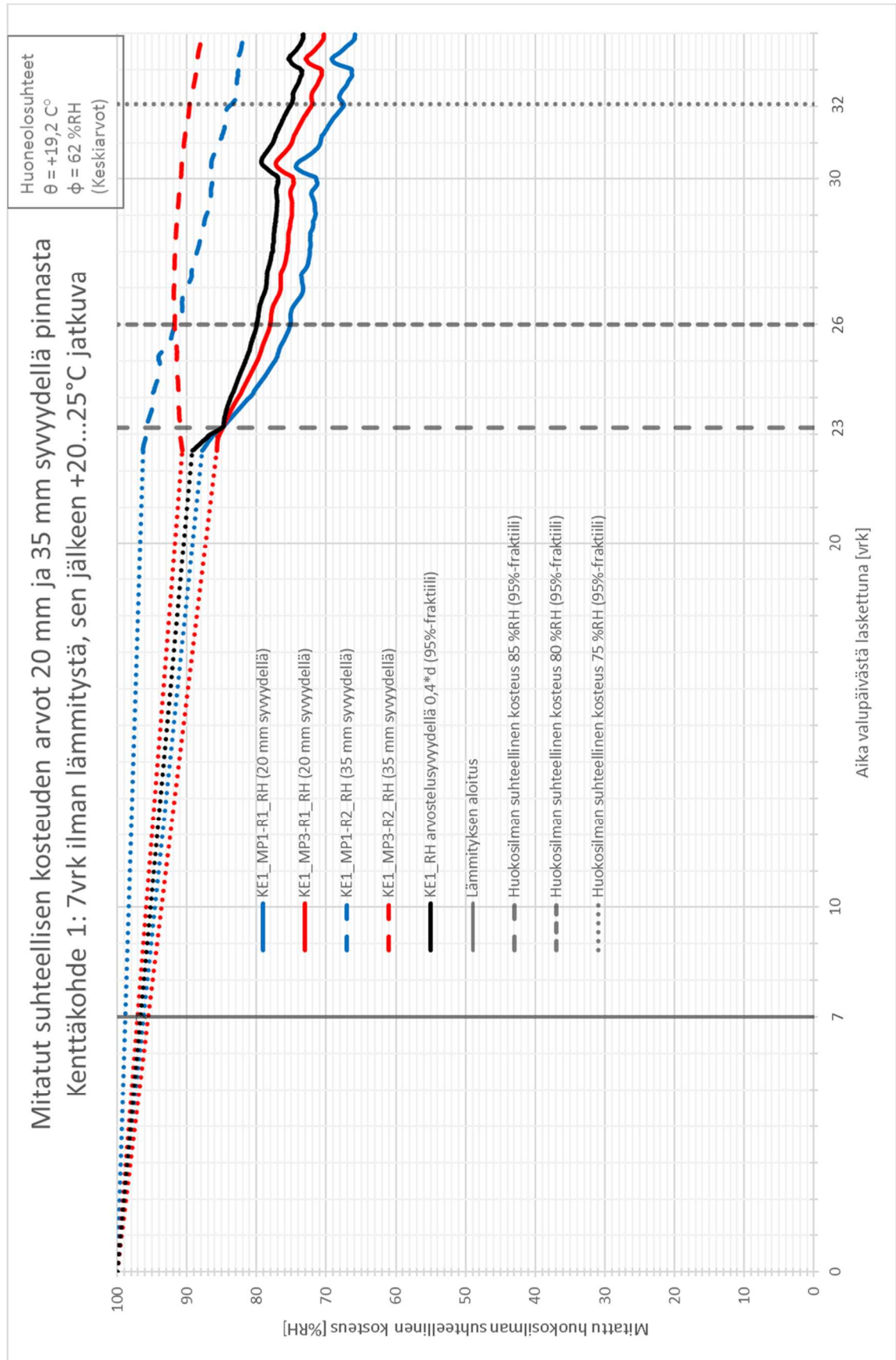


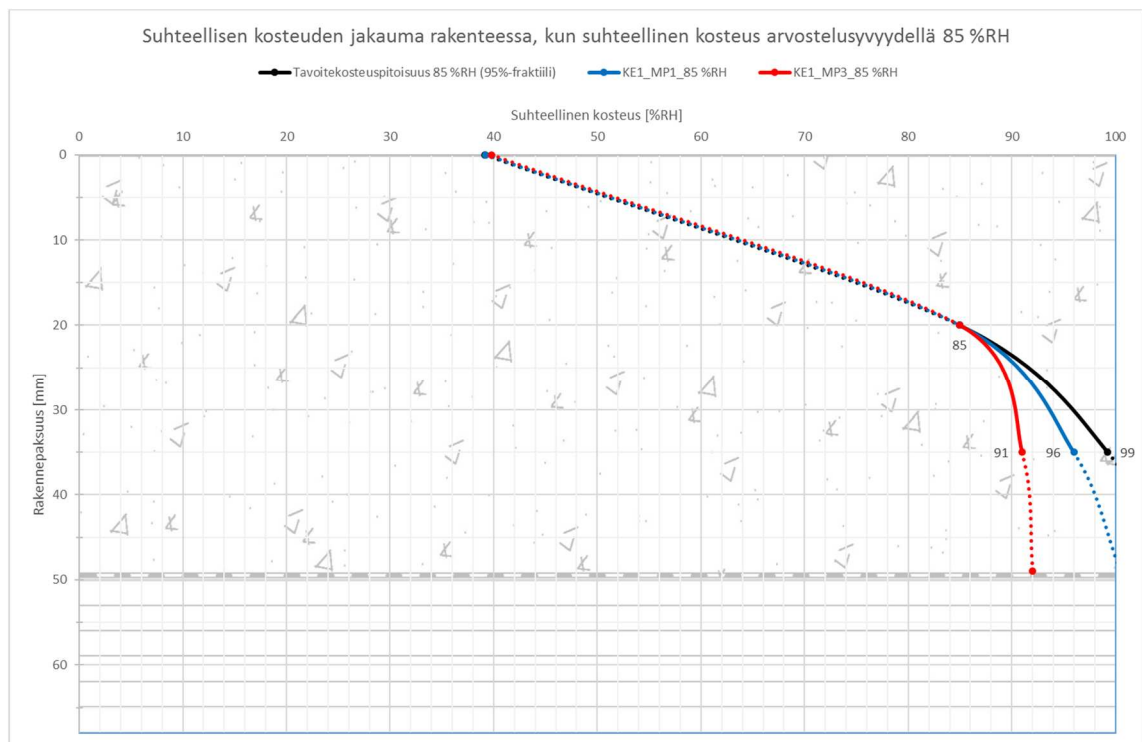
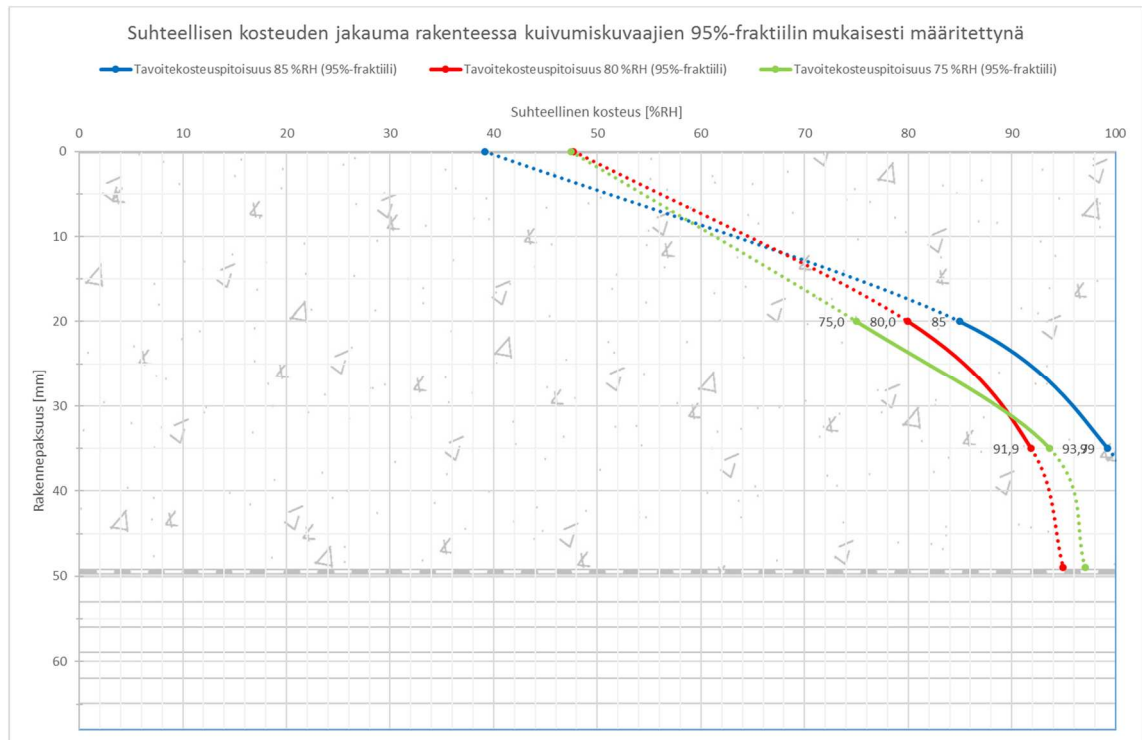
TOTEUTUS

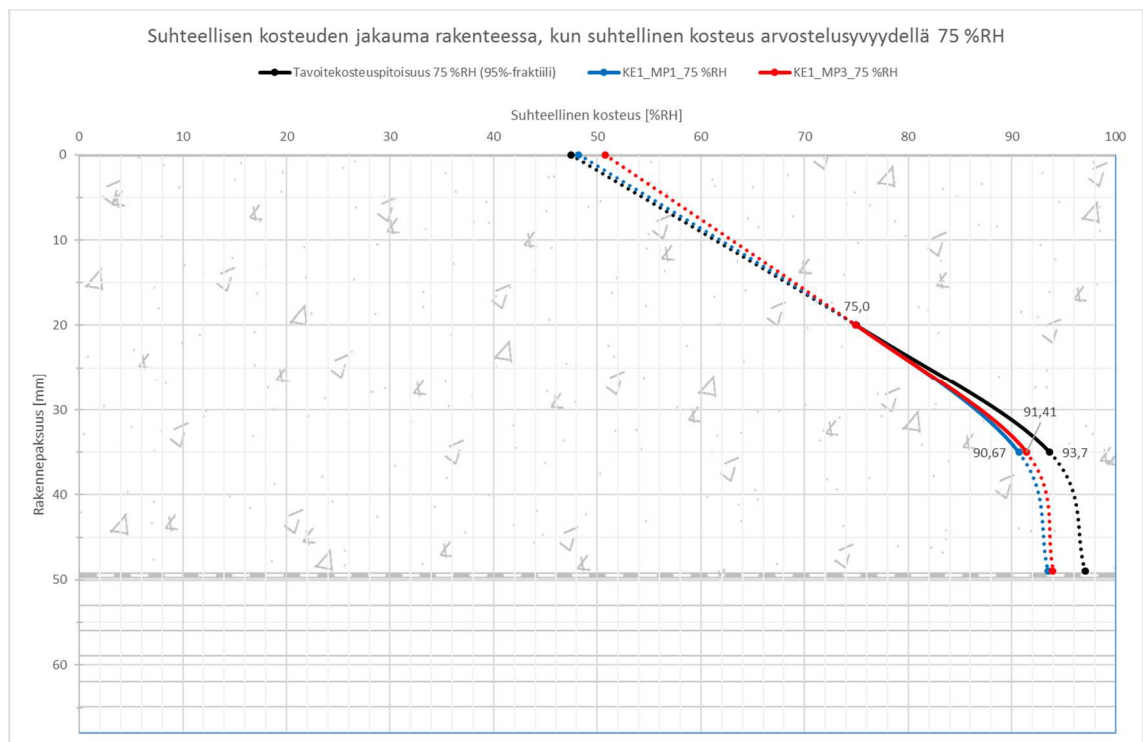
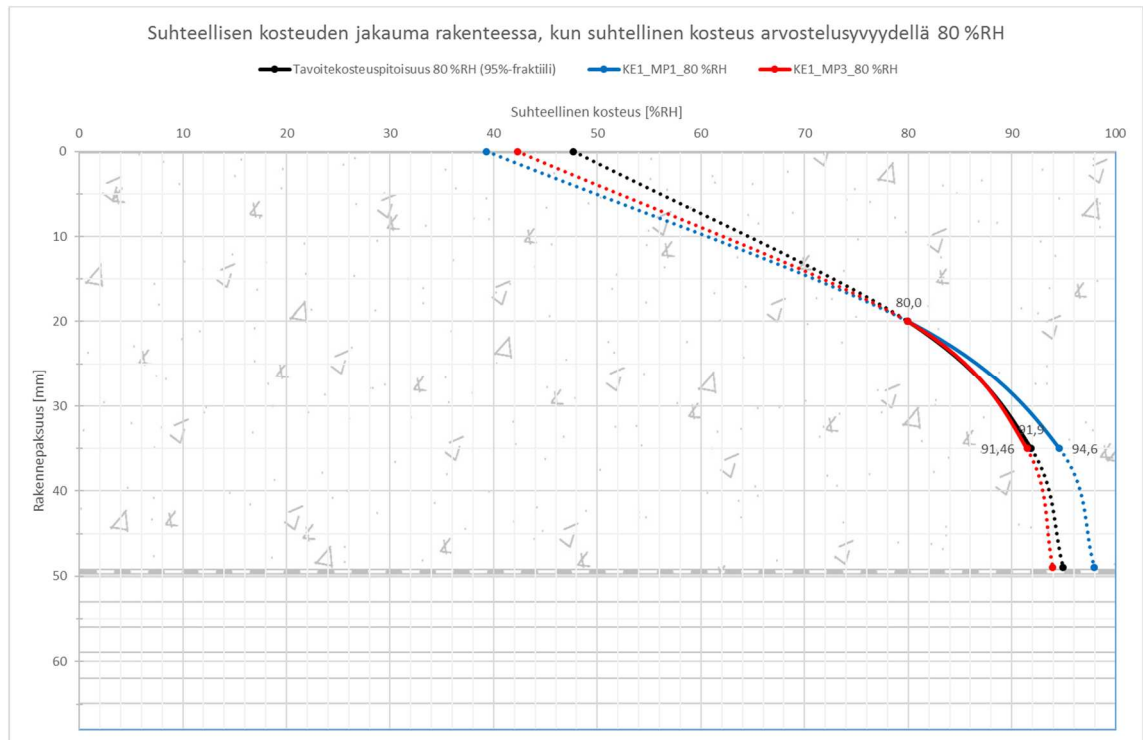


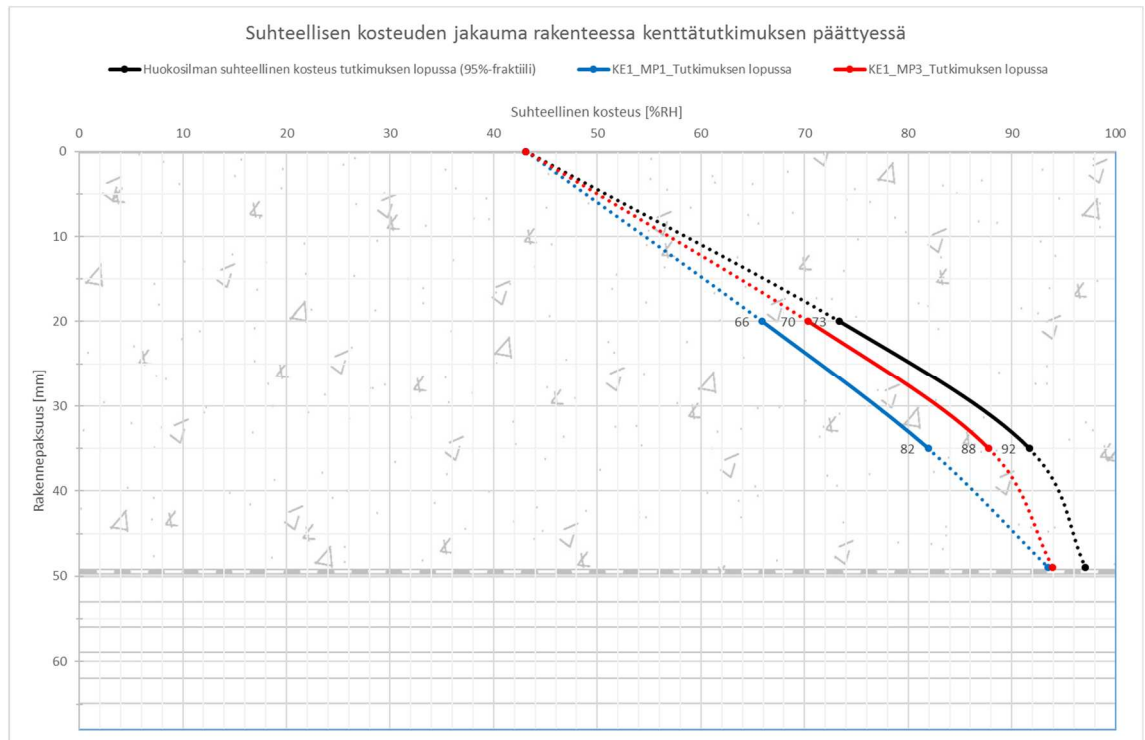
HUONEOLOSUHTEET KENTTÄ 1

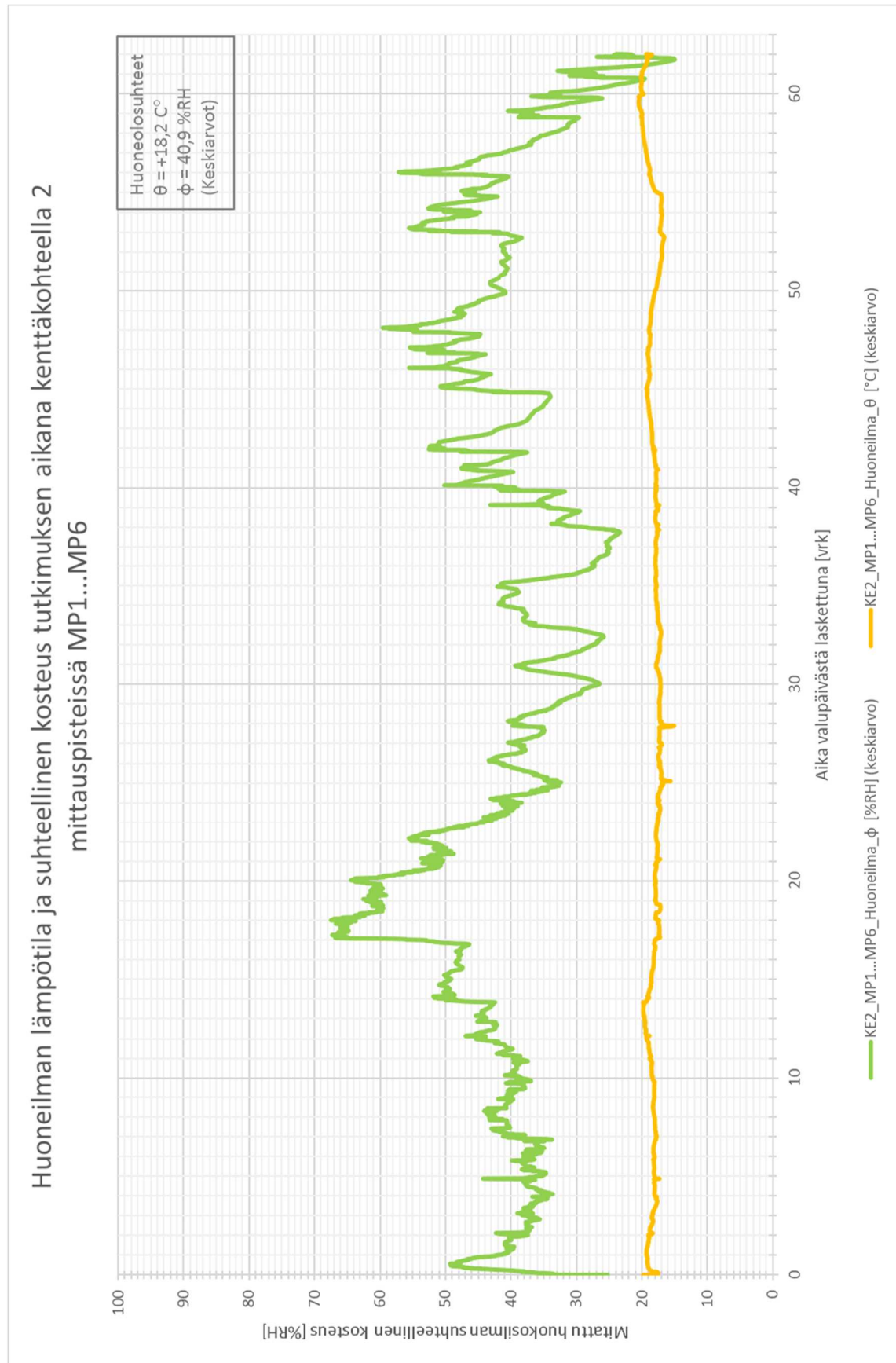




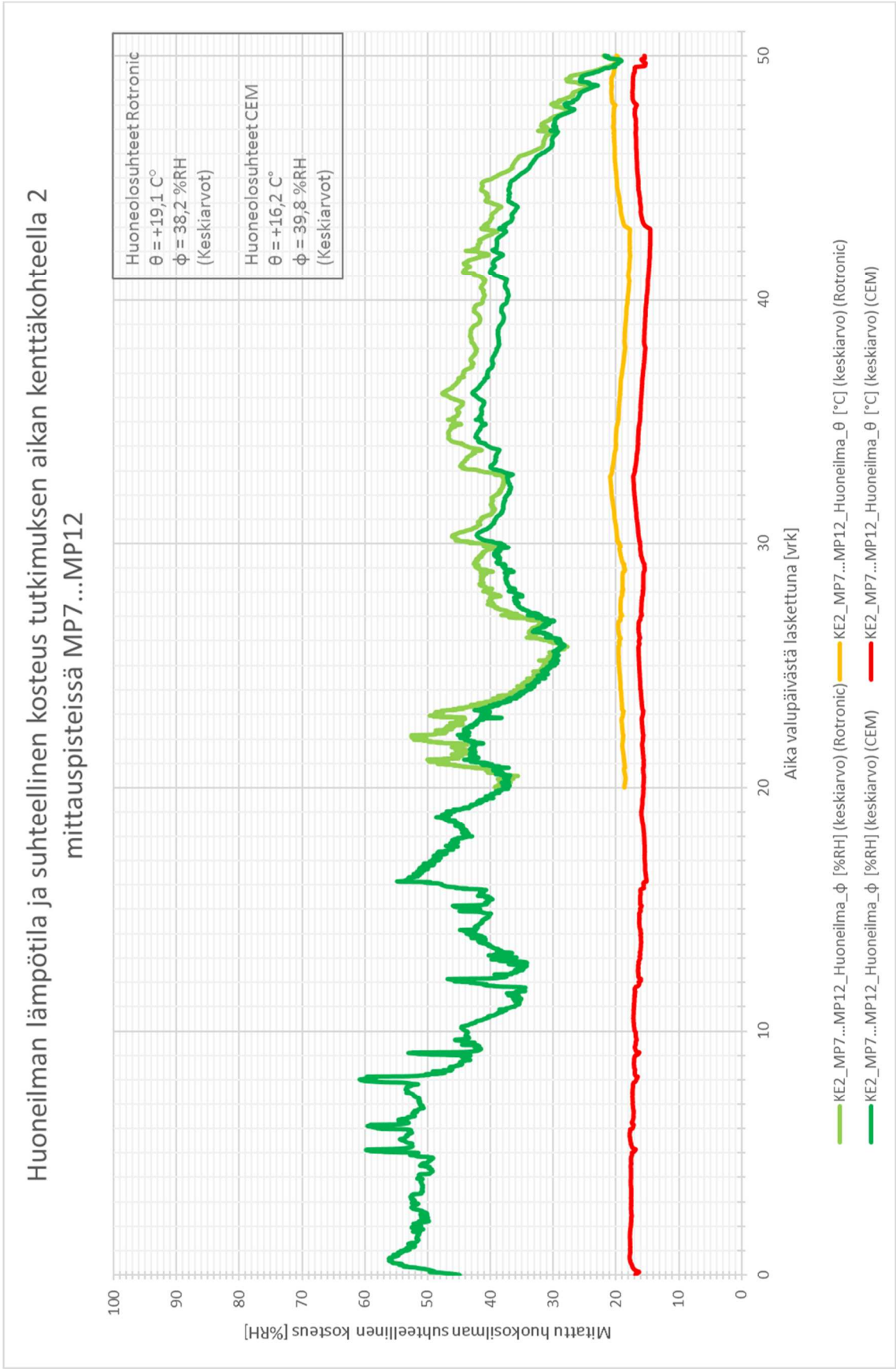


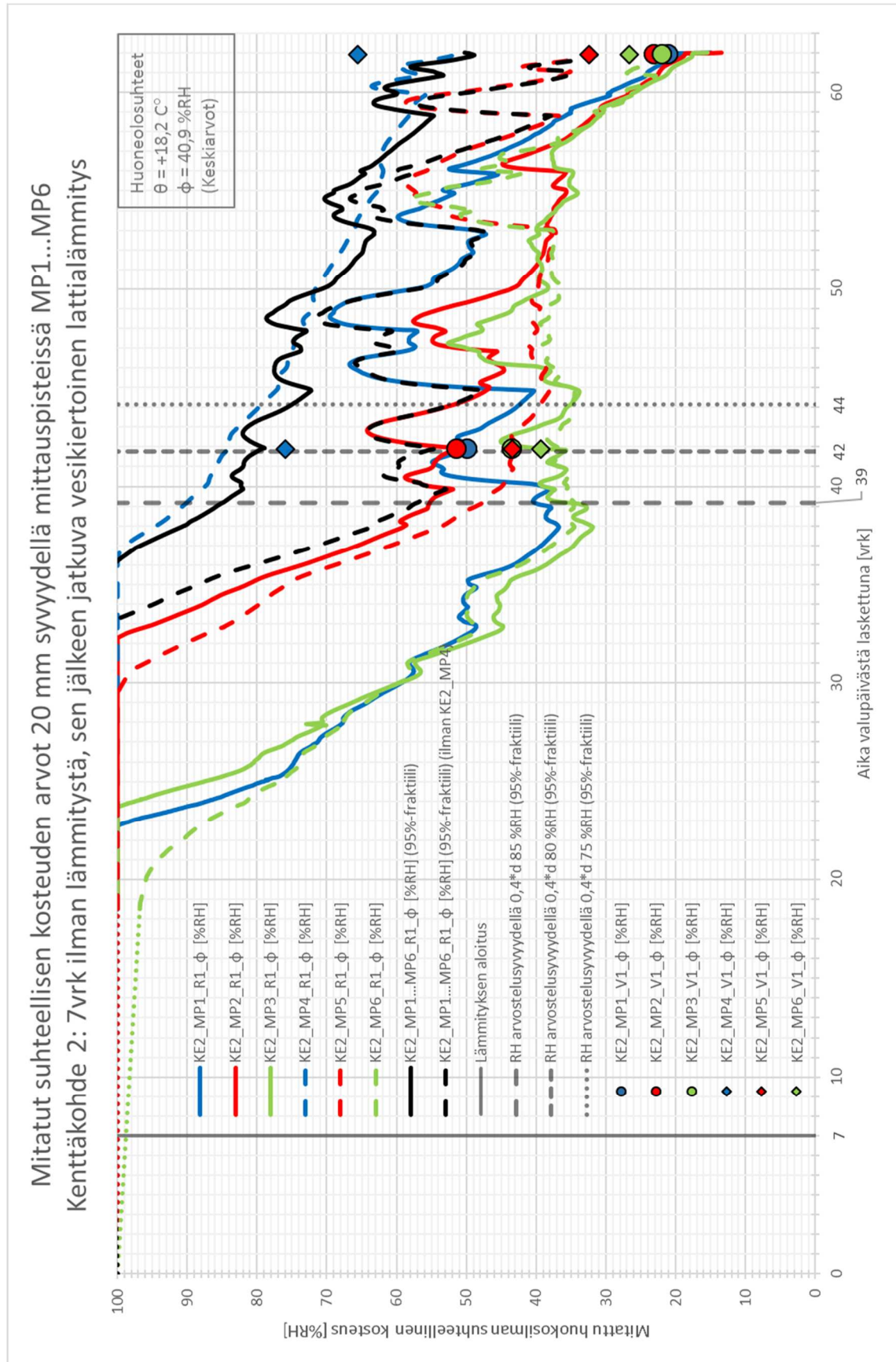


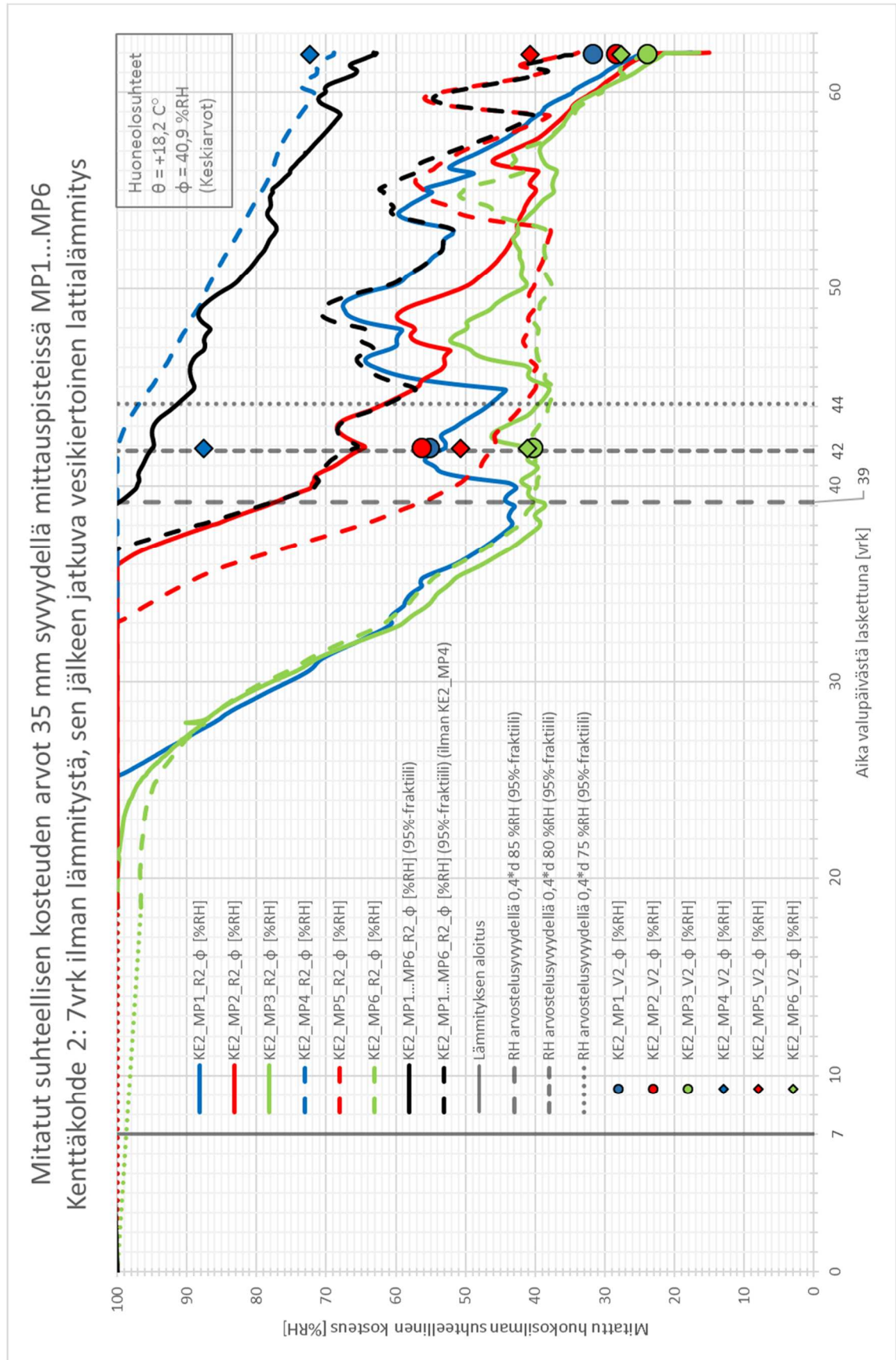


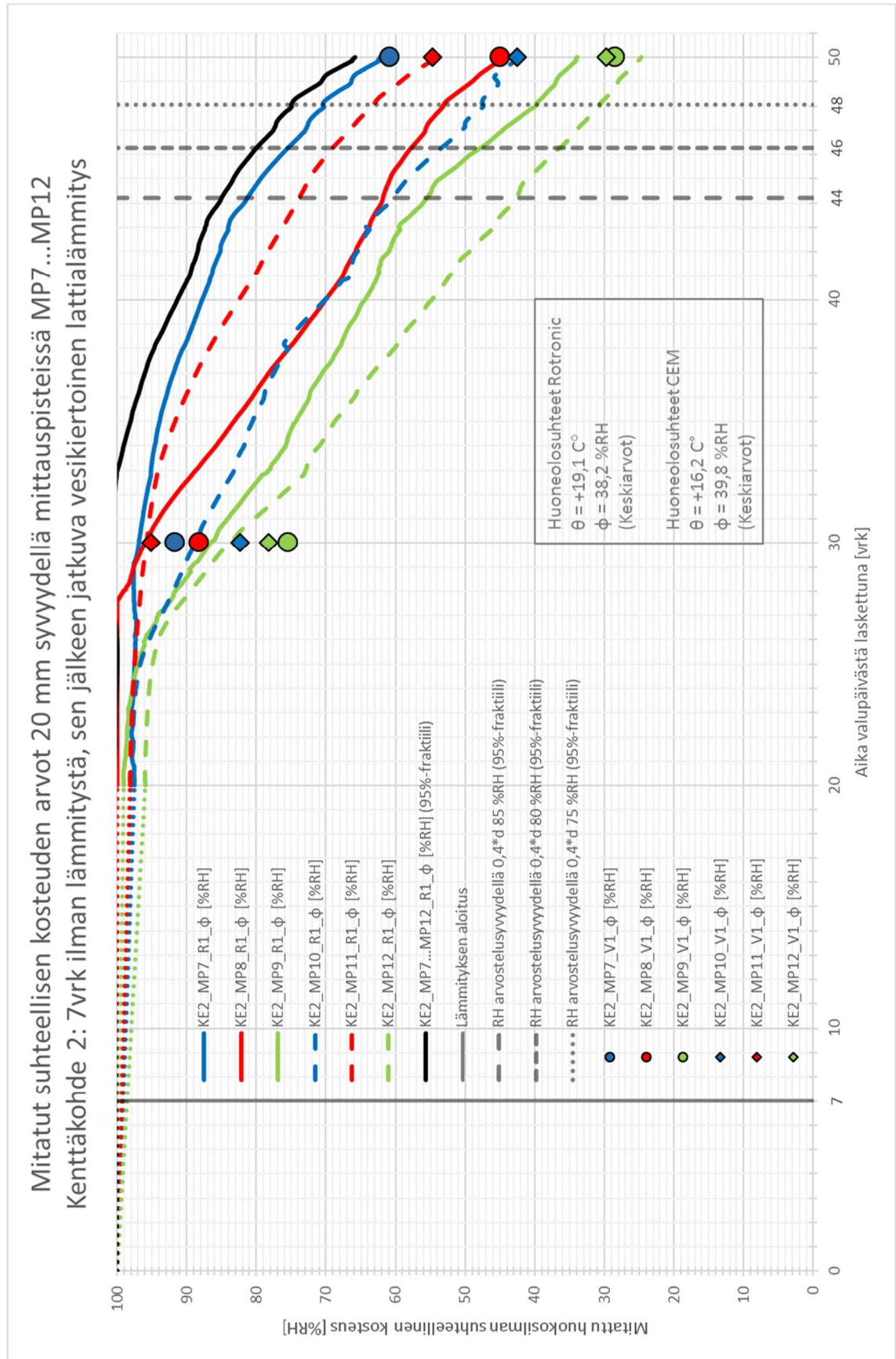
HUONEOLOSUHTEET KENTTÄ 2 MP1...MP6

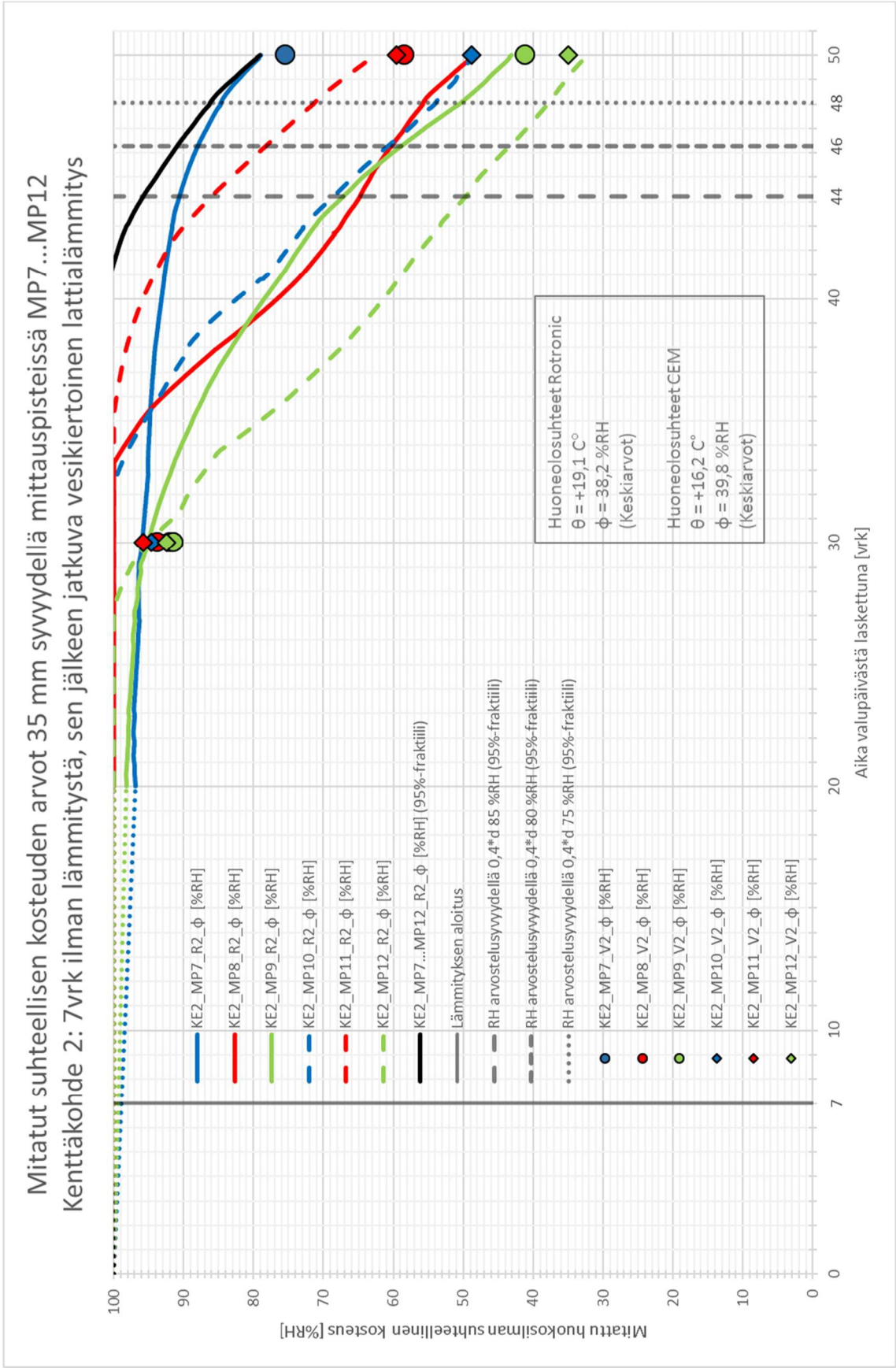
HUONEOLOSUHTEET KENTTÄ 2 MP7...MP12

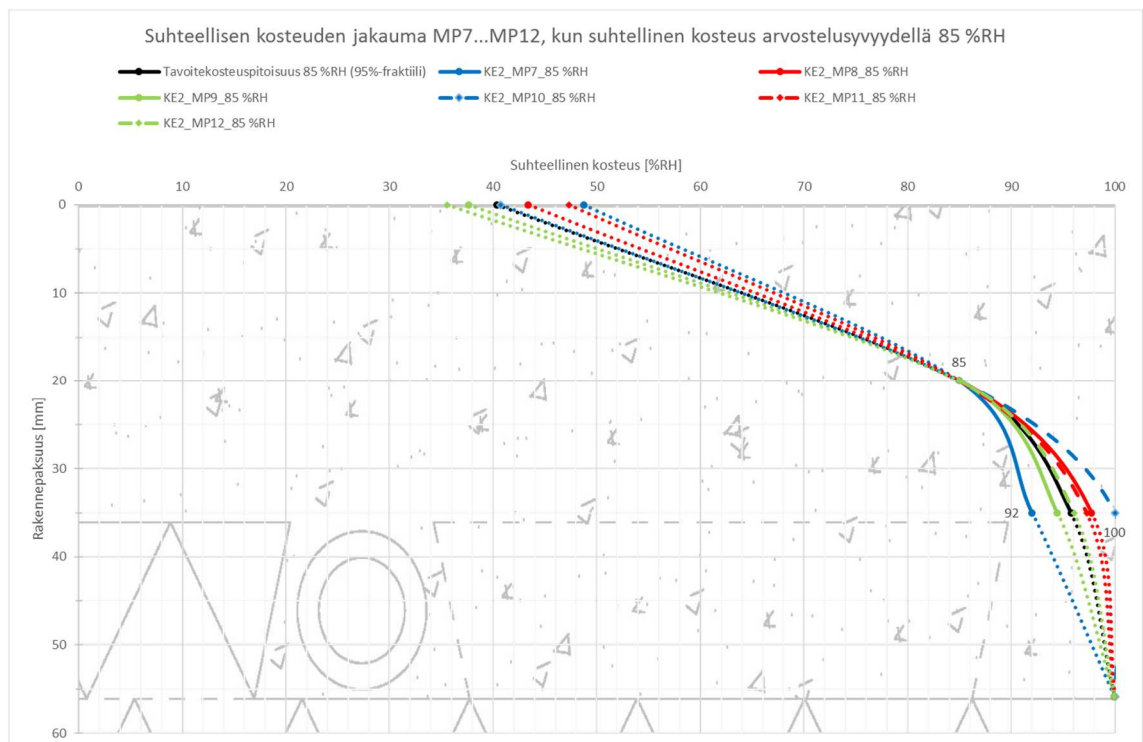
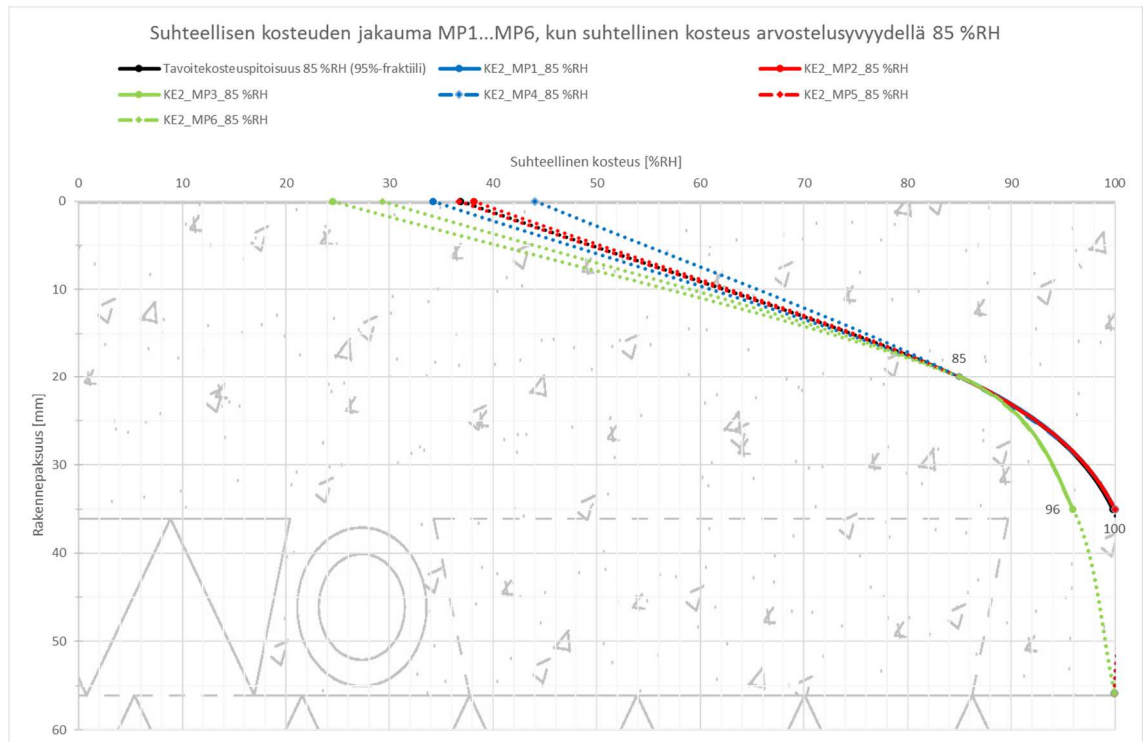


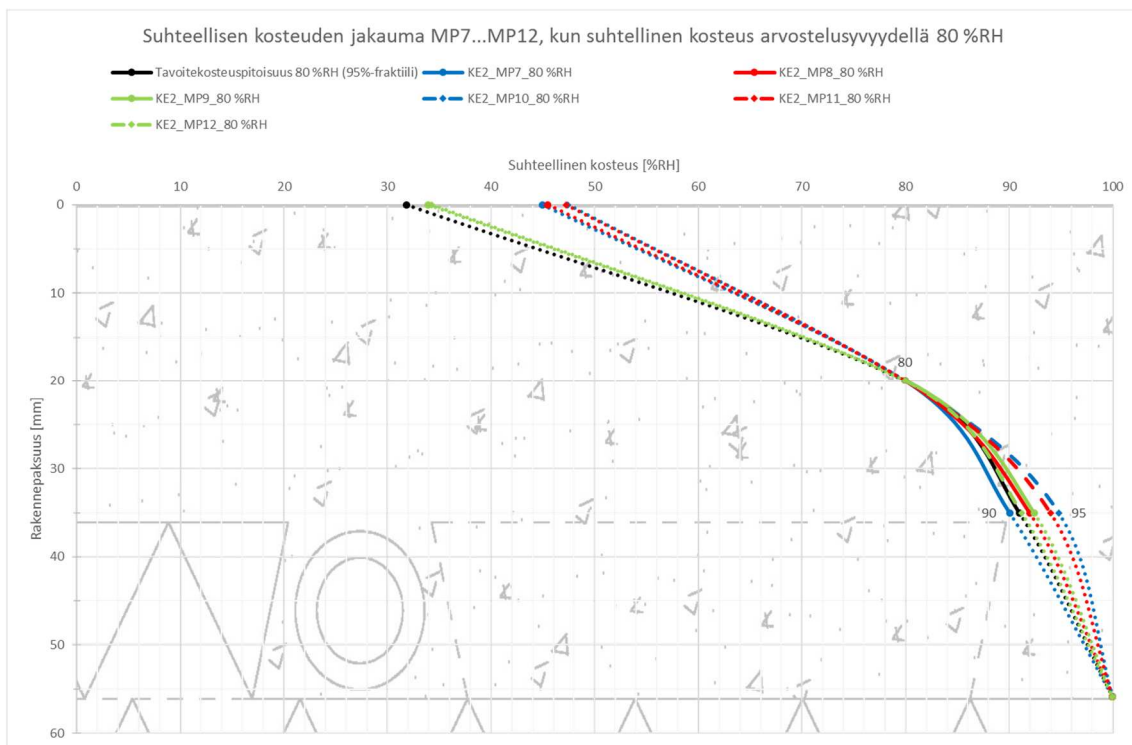
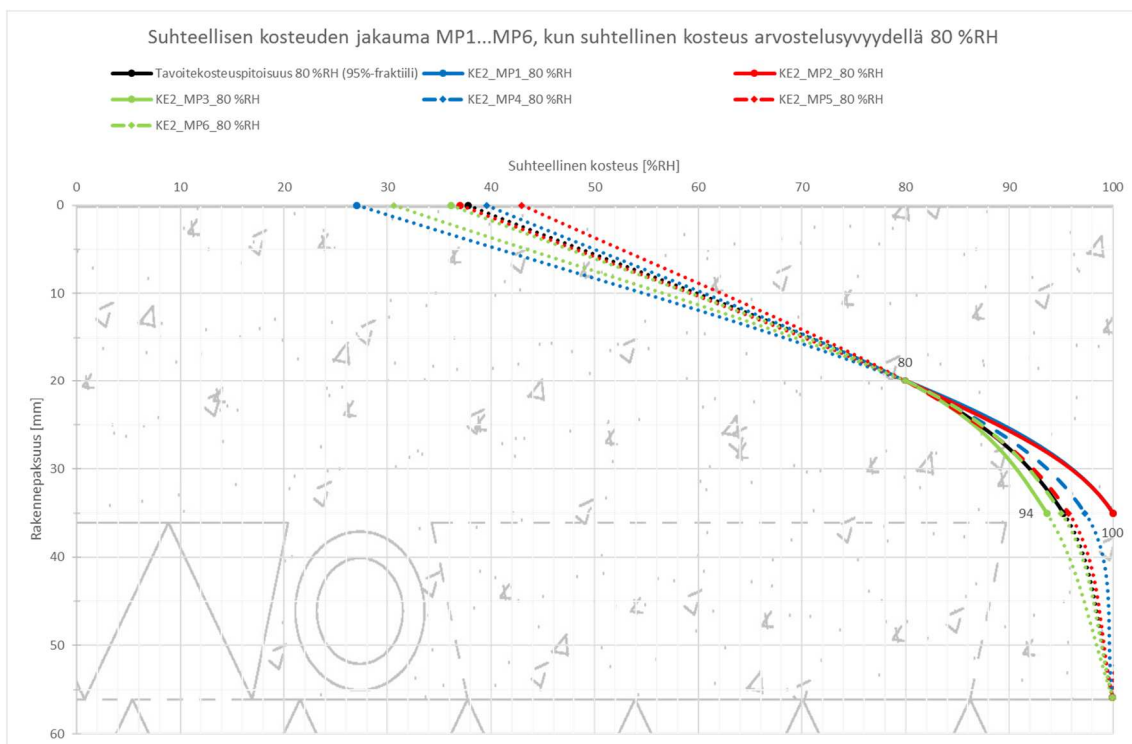


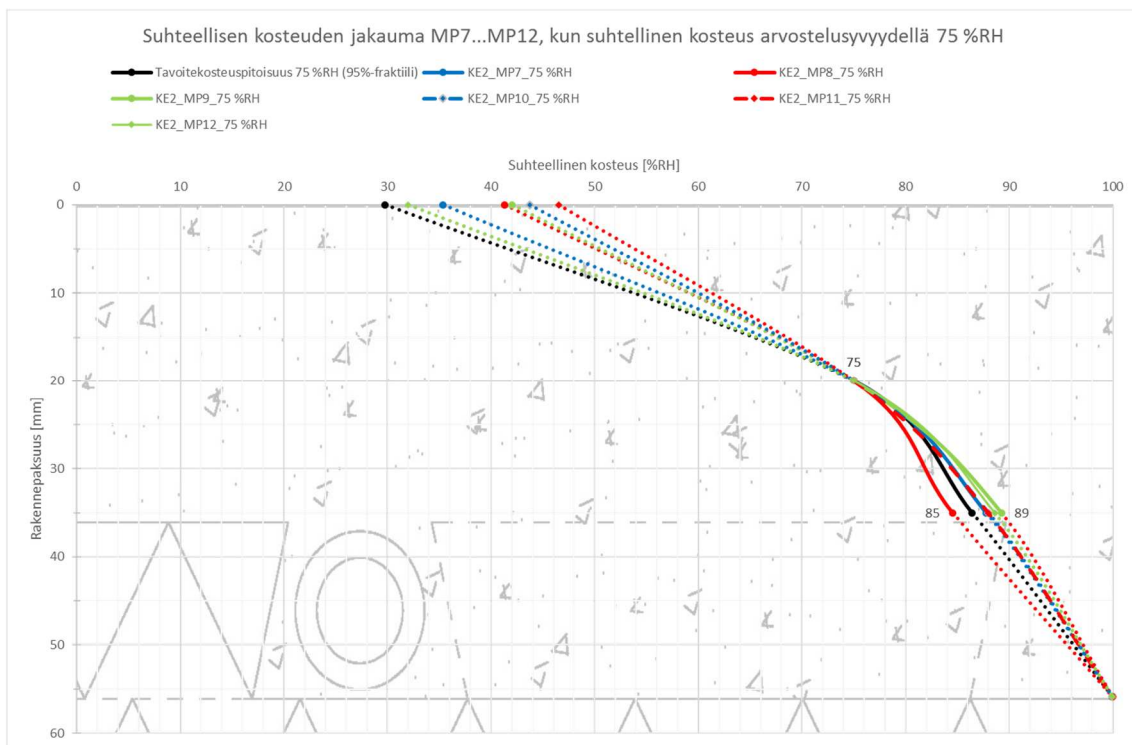
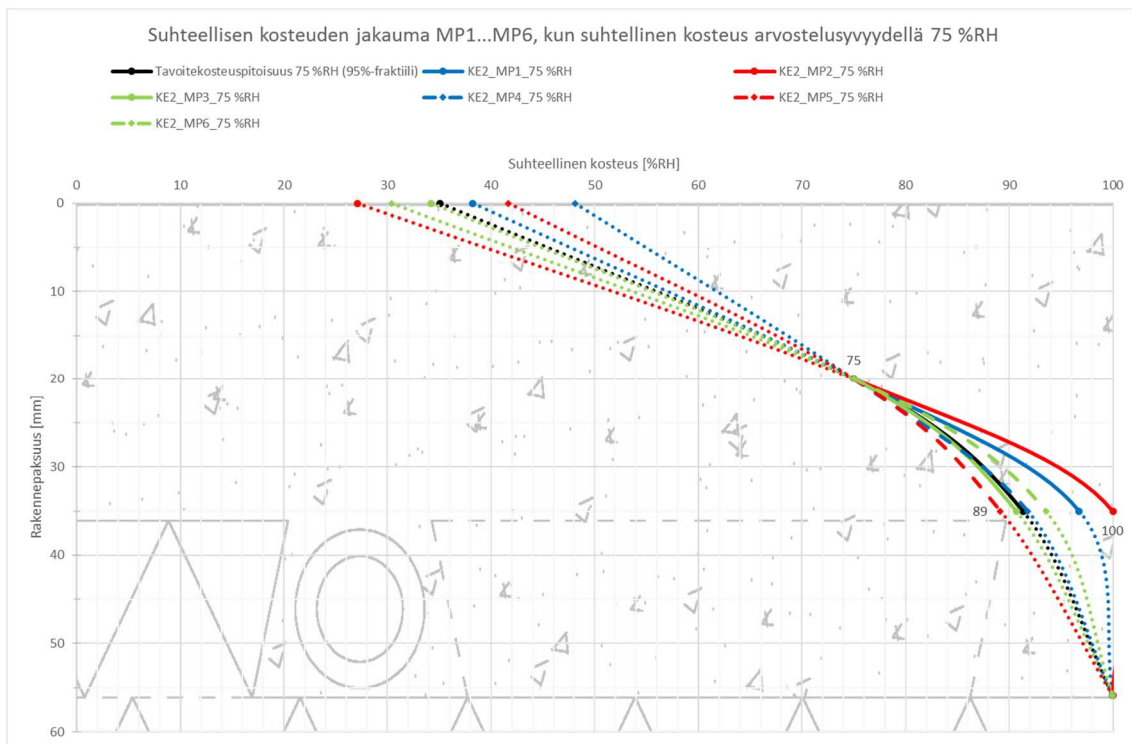


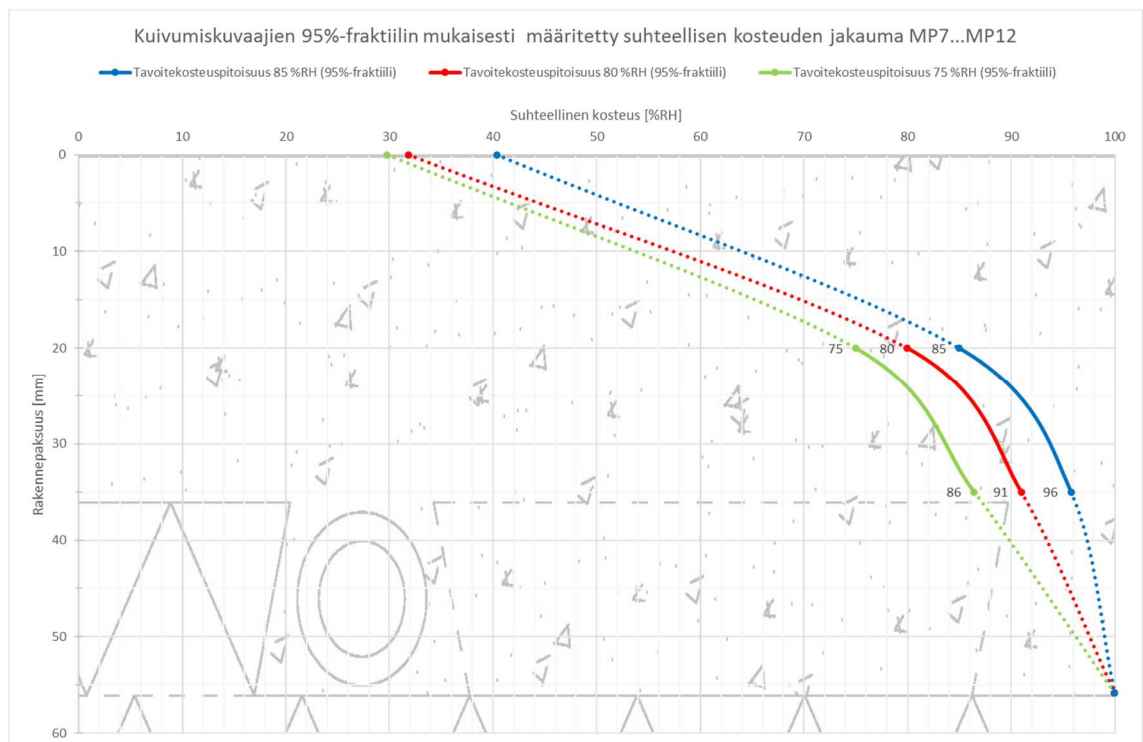
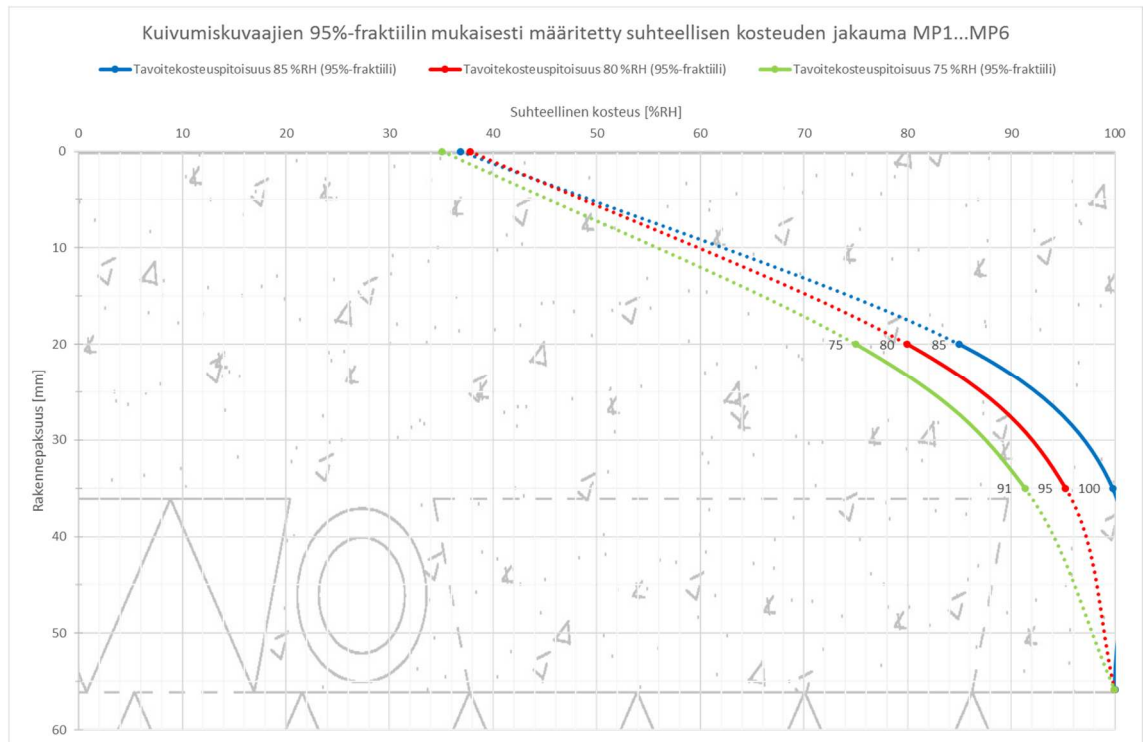












KAPASITANSSINEULAPARIEN MITTAUSTULOKSET

